

04-044

**ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY AS COAGULANT-FLOCCULANT OF MUCILAGE OBTAINED FROM PRICKLY PEAR (*Opuntia ficus-indica*)**

Figueroa Márquez, Ingrid Fabiana <sup>(1)</sup>; Leigue Fernández, María Alejandra <sup>(1)</sup>; Angulo Reyes, María Rosalva <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Católica Boliviana San Pablo

Water purification continues to be a matter of concern in several rural areas in Bolivia. Within SDG 6, affordable and accessible methods are sought for water treatment in remote areas. This work aimed to evaluate the efficiency as a coagulant-flocculant of the mucilage obtained from the Prickly Pear (*Opuntia ficus - indica*), a wild-growing plant, to remove turbidity from the surface and synthetic waters. The mucilage was extracted with 96% ethanol, dried and pulverized. Turbidity, coagulant dose, and initial pH modification were determined. River water samples with turbidity between 117 to 120 NTU and synthetic water with turbidity between 50 to 683 NTU were used. The optimal dose for river water was 35 mg/L and an efficiency of  $80.40 \pm 1.16\%$  and 20 mg/L and  $82.9 \pm 1.68\%$  efficiency for synthetic water of similar turbidity. In both cases, the pH of the water did not change. The results show that the mucilage is more efficient in water with high turbidity (>110 NTU). Additionally, coagulation, followed by a filtration stage, would allow reaching the turbidity established in the regulations for drinking water.

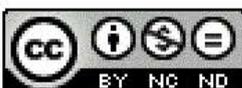
*Keywords:* Mucilage; *Opuntia ficus – indica*; natural coagulant; turbidity; drinking water

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA COMO COAGULANTE-FLOCULANTE DEL MUCÍLAGO OBTENIDO A PARTIR DE LA TUNA (*Opuntia ficus-indica*)**

La potabilización del agua sigue siendo un tema de preocupación en zonas rurales en Bolivia. Dentro del marco del ODS 6 se busca métodos económicos y accesibles para el tratamiento del agua en áreas alejadas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia como coagulante-floculante del mucílago obtenido de la Tuna (*Opuntia ficus – indica*) para remover la turbiedad de aguas superficiales y aguas sintéticas. El mucílago se obtuvo por extracción con etanol al 96 %, se secó y pulverizó. Se determinó la turbidez, dosis del coagulante y modificación del pH inicial. Se trabajó con muestras de agua de río con turbidez entre 117 a 120 NTU y con agua sintética con turbidez de entre 50 a 683 NTU. La dosis óptima para el agua de río fue de 35 mg/L y una eficiencia de  $80.40 \pm 1.16\%$  y de 20 mg/L y  $82.9 \pm 1,68\%$  de eficiencia para el agua sintética de similar turbidez. En ambos casos el pH del agua no sufrió modificación. Los resultados muestran que el mucílago es más eficiente en aguas con turbidez alta (>110 NTU) y que la coagulación seguida de una etapa de filtración permitiría alcanzar la turbidez establecida en la normativa para aguas de consumo.

*Palabras clave:* Mucílago; *Opuntia ficus – indica*; coagulante natural; turbidez; agua potable

*Agradecimientos:* Las autoras agradecen el financiamiento del Proyecto CReA de la cooperación Belga VLIR-UOS para la realización de este trabajo.



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

La potabilización del agua sigue siendo un tema de preocupación en varias zonas rurales en Bolivia. Si bien la cobertura global de distribución de agua se ha incrementado en los últimos años, y cerca del 86% de la población tiene acceso al agua potable, la brecha entre las ciudades y el área rural todavía es considerable. Menos del 70% de la población rural accede a agua potable (Cooperación Alemana para el Desarrollo con Bolivia, 2019). En Bolivia como en otros países de Latinoamérica existen muchos desafíos para incrementar la cobertura de acceso al agua potable y a los sistemas de saneamiento. Uno de los problemas a los que se enfrentan en áreas rurales es la falta de capacidades técnicas y financiamiento para la sostenibilidad de los sistemas de potabilización del agua. Es así como enmarcados en los lineamientos del ODS 6 los métodos de tratamiento empleados en estas zonas deben ser simples y de bajo costo.

Dentro de los tratamientos para la potabilización de aguas superficiales, la coagulación es un proceso esencial (Miller et al., 2008). Su aplicación permite la eliminación de especies químicas, como metales disueltos, turbidez e incluso disminuir la presencia de patógenos en el agua. Este proceso se realiza tradicionalmente mediante la adición de coagulantes-floculantes químicos como el sulfato de aluminio,  $(Al_2(SO_4)_3)$ , sulfato férrico  $(Fe_2(SO_4)_3)$ , cloruro de aluminio  $(AlCl_3)$ , cloruro férrico  $(FeCl_3)$  y policloruros de aluminio (PAC) (Miller et al., 2008; Otálora et al., 2022; Yin, 2010). Sin embargo, estos coagulantes tienen inconvenientes asociados a sus altos costos, y a la producción de grandes cantidades de lodos con riesgos potenciales para el medio ambiente. Además, un creciente número de estudios ha mostrado los posibles efectos tóxicos, particularmente neurotóxicos asociados al consumo de agua y alimentos contaminados con trazas de aluminio (Flaten, 2001; Igbokwe et al., 2019; Yin, 2010), por lo que en años recientes se ha buscado sustituirlo como agente coagulante-floculante por otros más inocuos. Entre las nuevas técnicas para el tratamiento de aguas se encuentra la coagulación empleando bio-coagulantes, con el fin de potabilizar el agua y reducir el uso de químicos nocivos para el ambiente y la salud humana (Choy et al., 2014; Šćiban et al., 2009; Yin, 2010).

Entre las ventajas de los coagulantes naturales de origen vegetal se destacan su bajo costo, pueden ser obtenidos mediante tecnologías simples y muchas veces a partir de subproductos agrícolas como cáscaras de frutas (Otálora et al., 2022), es poco probable que produzcan el abatimiento extremo del pH y los lodos producidos son altamente biodegradables (Otálora et al., 2022; Yin, 2010), además contribuyen a la reducción de los microorganismos patógenos (Jerri et al., 2012). Se han experimentado con éxito los coagulantes obtenidos del morango (*Moringa oleifera*) (Jerri et al., 2012; Meza-Leones et al., 2018), planta de guar (*Cyamopsis psoraloides*) y semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) entre otras (Gurdián López & Coto Campos, 2011). Las plantas de los que se obtienen los coagulantes naturales pueden cultivarse, cosecharse y procesarse localmente, lo que representa una disminución importante de costos (De Souza et al., 2014).

Ese es el caso de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) empleada en este estudio y que crece de forma silvestre en vastas zonas del Valle Central de Tarija. El género *Opuntia* (familia cactácea) se caracteriza por la producción de un hidrocoloide, conocido como mucílago, el cual, forma redes moleculares que pueden retener grandes cantidades de agua. El mucílago se conforma por diferentes tipos de polisacáridos, que son parte de los elementos estructurales del sistema celular de las plantas (Parra et al., 2011). El mucílago es una sustancia gomosa producida en las células que se encuentran tanto en la clorénquima como en el parénquima (Miller et al., 2008). El ácido poligalacturónico presente en el mucílago de la tuna pareciera ser el responsable de su capacidad coagulante (Miller et al., 2008; Villabona Ortiz et al., 2013).

Por lo anteriormente mencionado, el objetivo principal de este estudio fue evaluar la eficiencia como coagulante-floculante del mucílago obtenido de la tuna (*Opuntia ficus – indica*) para remover la turbiedad presente en aguas superficiales y aguas sintéticas preparadas en el laboratorio. Se comparó, además, la eficiencia de este bio-coagulante con la remoción obtenida utilizando sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) como coagulante inorgánico tradicional.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Caracterización de la penca de tuna fresca

Se tomó una muestra representativa de las pencas, se lavaron y cortaron en pequeñas tiras. Las muestras obtenidas se sometieron a un análisis fitoquímico, con el fin de identificar la presencia de proteínas, azúcares reductores como glucosa y fructosa, azúcares totales y grasas presentes en el cactus. Esta caracterización se realizó en el Centro de análisis, investigación y desarrollo (CEANID) Laboratorio Oficial del Ministerio de Salud y Deportes del Estado Plurinacional de Bolivia. Los parámetros analizados fueron azúcares reductores, azúcares totales, grasa y proteína total.

### 2.2 Preparación del Agua Turbia Sintética

El agua turbia sintética se preparó siguiendo el procedimiento propuesto por Šćiban et al. (2009), de forma resumida se preparó una solución stock compuesta por arcilla añadida al agua destilada. La suspensión se agitó por 1 h a 400 rpm en un agitador magnético a temperatura ambiente. La mezcla se dejó sedimentar por 24 h y se decantó el sobrenadante. El agua turbia sintética tenía un pH de  $6.98 \pm 0.18$  medido con un multiparámetro Hach HQ40D equipado con una sonda de pH. A partir de la mezcla resultante se realizaron diluciones hasta lograr el nivel de turbidez deseado. De la solución stock de arcilla preparada, se obtuvo muestras de 50, 100 y 600 NTU empleadas en las pruebas.

### 2.3 Obtención del mucílago de *Opuntia ficus- indica*

Las pencas de cactus *Opuntia ficus-indica* se adquirieron de agricultores locales en la zona Santa Ana La Nueva, localidad ubicada a pocos kilómetros de la ciudad de Tarija. Una vez en el laboratorio, se quitaron las espinas y capa externa (epidermis) de las pencas del cactus, se lavó y se cortó en tiras. Para la extracción del mucílago se siguió el procedimiento indicado por Villabona Ortiz et al., (2013). La pulpa en trozos se sometió a un proceso de secado, en una estufa a una temperatura de 70-75 °C por 48 h. Las tiras de cactus deshidratadas se trituraron utilizando un molidor eléctrico hasta obtener un material granulado, el cual fue cernido con una serie de tamices Tyler hasta obtener partículas muy finas de 0.25 mm. El polvo obtenido se sometió a un proceso de extracción Soxhlet durante 6 h utilizando etanol al 96% como solvente. Al final del proceso de extracción se observó que el solvente, adquirió una coloración verde oscura debido a la extracción de los pigmentos de la tuna y la pasta resultante era de color marfil claro. La pasta resultante se secó a en un horno a 60° C por 2 h y se almacenó en el desecador a temperatura ambiente hasta su uso.

### 2.3 Preparación de las soluciones de coagulantes

Para preparar las soluciones se pesó 1.0 g de mucílago y 1.0 g de sulfato de aluminio y se disolvieron por separado en 100 mL de agua deionizada. Las soluciones de mucílago fueron preparadas antes de su uso. Se utilizaron dosis de 5.0 mg/L de sulfato de aluminio y de 10 a 100 mg/L de mucílago en las pruebas de coagulación-floculación.

## 2.4 Pruebas de coagulación-floculación

Para las pruebas de coagulación-floculación se optó por un diseño experimental aleatorio simple. Para evaluar el poder coagulante del mucílago obtenido, se empleó una prueba de jarras. El aparato permite trabajar con cuatro vasos de 1.0 L de capacidad por vez y controlar el tiempo de agitación, así como la velocidad de mezclado. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente ( $20 \pm 2$  °C). Para las pruebas de coagulación se llenaron los vasos de prueba y se añadió la dosis fijada de bio-coagulante o de sulfato de aluminio, se agitó a 250 rpm durante 1 min, luego a una agitación lenta a 40 rpm durante 20 min, seguido de una sedimentación por 1 h. En todos los casos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente. La medición de la turbidez se realizó al inicio y al final de la prueba con un turbidímetro Hach 2100Q, de acuerdo con el procedimiento estandarizado por el fabricante. El pH de las muestras se determinó con un multiparámetro Hach HQ40D equipado con una sonda de pH. Los análisis de los parámetros de turbidez y pH, utilizando el mucílago y el coagulante químico (sulfato de aluminio), se realizaron por triplicado.

El porcentaje de remoción se calculó de acuerdo con la ecuación (1).

$$\%Remoción = \frac{NTU_0 - NTU_f}{NTU_0} \quad (1)$$

Donde,  $NTU_0$  y  $NTU_f$  son los valores iniciales y finales de turbidez, respectivamente.

Se ensayaron dosificaciones entre 10 a 100 mg/L de bio-coagulante al 1.0% de mucílago, de acuerdo con la turbidez inicial del agua a tratar. Se realizaron también pruebas para ver el efecto del agregado de 5.0 mg/L de sulfato de aluminio al 1.0% sobre la remoción de la turbidez y se compararon con el efecto del mucílago solo.

## 2.5. Análisis estadístico

Los parámetros de calidad del agua turbia sintética, así como del agua de río dados por la turbidez y el pH después del proceso de coagulación/floculación se reportaron como la desviación estándar media ( $n = 3$ ).

## 3. Resultados

### 3.1. Composición de los cladodios

Los resultados de los análisis de los cladodios se reportaron en base seca (tabla 1). En la bibliografía no se pudo encontrar una composición media comparable debido a que las diferentes zonas, condiciones edáficas, climáticas y de cultivo de la planta pueden modificar su composición (Sáenz et al., 2004).

**Tabla 1: Resultados del análisis de la pulpa de la penca de tuna en base seca**

Parámetro	Métodos de ensayo	Unidad	Resultado
Azúcares reductores	NB 38033:06	%	10.19
Azúcares totales	NB 38033:06	%	11.59
Grasa	NB 313019:06	%	1.27
Proteína total (Nx6.25)	NB/ISO 8968-1:08	%	14.39

### 3.2 Pruebas de coagulación-floculación

Se realizaron ensayos tanto con los coagulantes puros como con la mezcla de ambos. Se ensayo con muestras de agua turbia sintética preparada con valores de entre 50 y 690 NTU.

Los resultados de las tres primeras pruebas con agua sintética de baja turbidez se resumen en la Tabla 2. Como puede verse los resultados de remoción de la turbidez con mucílago puro, son bajos apenas superando el 26%. El añadido de 5.0 mg/L de sulfato de aluminio mejora el rendimiento notablemente en todos los casos. Así, para la dosificación de 10 mg/L de mucílago, la de más baja eficiencia de remoción, el rendimiento aumentó en un 77% comparado con el porcentaje de remoción del mucílago solo. Sin embargo, no se llega a alcanzar los porcentajes de remoción del sulfato de aluminio solo, que superan el 83% en todos los tratamientos.

Como se observa en la figura 1A la eficiencia en la remoción de la turbidez con el mucílago solo es dosis-dependiente, incrementándose con el aumento de la dosis de bio-coagulante. Contrario a lo que ocurre en los tratamientos al adicionar el sulfato de aluminio, en los que la mayor eficiencia se observa con la dosificación más baja del bio-coagulante de 10.0 mg/L de mucílago + 5.0 mg/L del sulfato de aluminio.

Por otro lado, el pH final en todos los tratamientos con el mucílago se mantuvo dentro de los rangos establecidos en la normativa para aguas de consumo en Bolivia NB 512. No ocurrió lo mismo en los tratamientos con sulfato de aluminio en los que el descenso de pH fue el esperado acorde a la experiencia en el empleo de este compuesto de alrededor de un 30% (figura 1B).

**Tabla 2: Resultados de remoción de niveles bajos de turbidez en agua sintética en la prueba de jarras con soluciones de mucílago y sulfato de aluminio al 1.0 %**

Dosis mucílago (mg/L)	Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	% eficiencia remoción	pH inicial	pH final	% variación pH
10	0	51.0±0.8	44.20±1.01	13.28±0.56	7.08±0.06	6.67±0.09	5.79±0.16
20	0		39.70±1.08	22.23±0.35		6.65±0.05	6.1±0.43
30	0		38.21±0.82	25.10±0.47		6.55±0.10	7.5±0.29
40	0		37.70±0.91	26.12±0.72		6.50±0.07	8.2±0.07
10	5	51.0±0.8	21.01±0.72	58.80±0.01	7.08±0.06	6.12±0.04	13.6±0.57
20	5		25.70±0.78	49.63±0.13		6.09±0.01	14.0±0.71
30	5		24.62±0.33	51.78±0.32		6.17±0.05	12.9±0.25
40	5		26.53±0.62	48.02±0.06		6.20±0.02	12.4±0.34
0	10	52.0±1.0	8.49±0.38	83.73±2.01	6.98±0.18	4.95±0.02	29.1±2.08
0	20		8.53±0.34	83.61±1.87		4.64±0.01	33.5±1.72
0	30		8.73±0.11	83.18±0.96		4.59±0.07	34.2±0.51
0	40		8.62±0.16	83.39±1.28		4.57±0.03	34.5±1.17.

Para probar la eficiencia del mucílago como coagulante en aguas de turbidez media se preparó una muestra de agua sintética con una turbidez de 175.67±2,08 NTU, el pH inicial fue de 6.89±0.21. Basados en los resultados de los primeros ensayos se aumentó la dosis

de mínima de coagulante a 20 mg/L, con incrementos de 10 mg/L en las tres dosificaciones siguientes. Los resultados obtenidos, que se presentan en la tabla 3, muestran eficiencias en la reducción de la turbidez de hasta 83%. Para complementar el ensayo, las muestras ya tratadas con el mucílago fueron filtradas a través de un filtro de grava y arena para simular a los empleados en los procesos tradicionales de potabilización de aguas superficiales, incrementándose la reducción de la turbidez hasta el 97% en todos los tratamientos ensayados. El pH del agua tratada sufrió modificaciones muy leves y no significativas en su valor, manteniéndose dentro del rango recomendado.

**Figura 1: Efectos de la dosis de mucílago solo y con añadido de  $Al_2(SO_4)_3$  sobre la eficiencia de remoción de turbidez (%) y el pH**

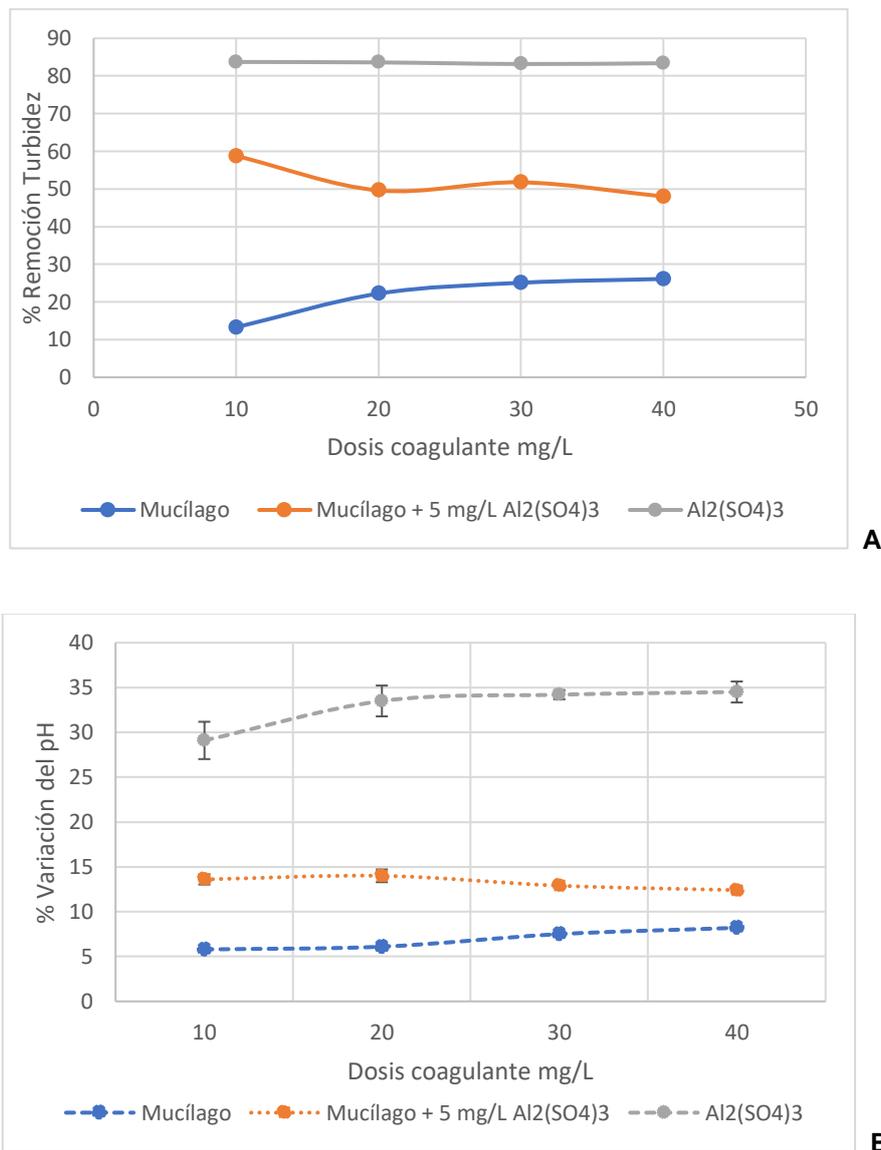


Figura 2A: Porcentajes de eficiencia con 4 dosificaciones de mucílago solo como bio-coagulante, mucílago más 5.0 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$  y 4 dosis de  $Al_2(SO_4)_3$ . 2B. Efecto sobre el pH del agua tratada en los tres tratamientos con 4 dosis de mucílago solo, mucílago +  $Al_2(SO_4)_3$  y  $Al_2(SO_4)_3$  solo.

**Tabla 3: Resultados de remoción de niveles medios de turbidez en agua sintética en la prueba de jarras con soluciones de mucílago al 1.0 % y posterior filtrado**

Dosis mucílago (mg/L)	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez post-coagulación (NTU)	Turbidez post-filtrado (NTU)	% eficiencia coagulación-floculación	% eficiencia remoción filtrado
20	175.67±2.08	30.0±1.53	4.6±0.26	82.9±1,68	97.4±0.62
30		33.7±1.25	5.0±0,17	80.7±1,63	97.1±0.43
40		32.0±1.16	4.5±0.14	81.7±2,08	97.4±0.95
50		34.0±2.08	4.3±0.92	80.6±2,29	97.5±0.78

**Tabla 4: Resultados de la variación del pH durante el proceso de remoción de niveles altos de turbidez**

Dosis mucílago (mg/L)	pH inicial	pH final	% variación pH
20	6.89±0.21	6.74±0.04	2.18±0.08
30		6.76±0.04	1.89±0.07
40		6.82±0.05	1.02±0.04
50		6.84±0.04	0.73±0.03

**Tabla 5: Resultados de remoción de niveles altos de turbidez en agua sintética en la prueba de jarras con soluciones de mucílago y sulfato de aluminio al 1.0 % solas y combinadas**

Dosis mucílago (mg/L)	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	% eficiencia remoción	pH inicial	pH final	% variación pH
70	0	683±10.5	114.00±2.00	83.32±0,29	7,65±0.08	6.87±0,14	10.23±1,84
80	0		121.67±2.51	82.10±0.36		6.76±0.11	11.68±1.41
90	0		118.20±0.92	82.69±0.13		6.68±0.03	12.68±0.39
100	0		117.27±0.81	82.83±0.12		6.65±0.07	12.94±0.94
70	5	683±10.5	108,60±0.19	84.21±0.28	7.65±0.08	6.44±0,13	15.73±1.68
80	5		111.67±0.57	83.65±0.08		6.51±0.02	14.91±0,27
90	5		112.33±2.08	83.70±0.30		6.49±0.04	15.29±0.47
100	5		111.77±2.52	83.65±0.37		6.54±0.06	14.77±0.82
0	70	678±14.2	2.89±0.09	99.57±0.01	7.22±0.06	4.42±0.07	38.90±1.05
0	80		2.83±0.07	99.58±0.01		4.38±0.03	39.33±0.42
0	90		2.74±0.03	99.59±0.00		4.37±0.01	39.47±0.14
0	100		2.48±0,14	99.62±0.02		4.36±0.08	39.62±1.15

En siguientes ensayos se simuló el escenario de turbidez del agua luego de una fuerte tormenta, caso en el que los valores pueden sobrepasar incluso los 800 NTU debido al

arrastre se sedimentos. La turbidez inicial en estos ensayos fue alrededor de 680 NTU y el pH estuvo entre  $7.22 \pm 0.06$  a  $7.65 \pm 0.08$ . Luego de una prueba preliminar (datos no presentados) se decidió emplear dosificaciones del mucílago y sulfato de aluminio de 70 a 100 mg/L. Los resultados promedio de los tratamientos con cuatro dosificaciones en cada caso, se presentan en la tabla 5. Como puede verse a pesar de emplear altas dosis del mucílago la variación del pH se mantuvo dentro de los límites permitidos para aguas de consumo, con rendimientos en la remoción de alrededor del 83% en todos los casos, por lo que podemos decir que el rendimiento no dependió de las dosificaciones de mucílago empleadas. El añadido de 5.0 mg/L de sulfato de aluminio no incrementó los rendimientos significativamente pero sí disminuyó el pH de todas las muestras en mayor porcentaje que con el mucílago solo. Por otro lado, el tratamiento con las mismas dosificaciones de sulfato de aluminio logro remociones iguales al 99.6% en todos los casos, no obstante, el descenso del pH del agua fue de casi 40%, con valores entre  $4.36 \pm 0.08$  y  $4.42 \pm 0.07$  muy por debajo de lo recomendado para aguas de consumo humano y que pueden ocasionar problemas operativos por lo que se requiere neutralizarlas.

Evaluando los resultados de los ensayos con agua sintética y la remoción de la turbidez con el bio-coagulante al 1.0% se decidió duplicar la concentración del bio-coagulante al 2.0% para verificar el impacto en rendimiento de la remoción de la turbidez en esa nueva condición. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6: Resultados de remoción de la turbidez en agua sintética en la prueba de jarras con soluciones de mucílago al 2.0 %**

Dosis mucílago (mg/L)	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	% eficiencia remoción	pH inicial	pH final	% variación pH
10	$50.00.1 \pm 1.40$	$25.30 \pm 0.85$	$49.50 \pm 1.71$	$6.67 \pm 0.13$	$6.77 \pm 0.11$	----- <sup>a</sup>
20		$28.20 \pm 1.50$	$43.71 \pm 3.00$		$6.51 \pm 0.15$	$2.40 \pm 1.25$
30		$28.00 \pm 1.37$	$44.11 \pm 2.72$		$6.60 \pm 0.08$	$1.05 \pm 0.47$
40		$29.00 \pm 0.55$	$42.12 \pm 1.10$		$6.57 \pm 0.07$	$1.50 \pm 0.64$
15	$118.00 \pm 5.36$	$47.20 \pm 0.39$	$60.00 \pm 0.09$	$7.22 \pm 0.64$	$6.64 \pm 0.10$	$13.6 \pm 0.76$
25		$47.70 \pm 0.87$	$59.58 \pm 0.18$		$6.60 \pm 0.08$	$14.0 \pm 1.03$
35		$47.00 \pm 0.73$	$60.17 \pm 0.75$		$6.57 \pm 0.13$	$12.9 \pm 1.12$
45		$48.10 \pm 0.48$	$59.77 \pm 0.68$		$6.51 \pm 0.18$	$12.4 \pm 0.97$
70	$670.00 \pm 12.40$	$106.00 \pm 1.33$	$84.18 \pm 1.51$	$7.20 \pm 0.45$	$6.50 \pm 0.24$	$29.1 \pm 1.97$
80		$99.00 \pm 2.21$	$85.22 \pm 1.06$		$6.56 \pm 0.36$	$33.5 \pm 2.01$
90		$86.00 \pm 1.97$	$87.16 \pm 1.32$		$6.54 \pm 0.29$	$34.2 \pm 1.75$
100		$63.20 \pm 2.05$	$90.57 \pm 1.09$		$6.57 \pm 0.62$	$34.5 \pm 1.74$

<sup>a</sup> la variación de pH en este caso es negativa por lo que no se anota.

Como se puede ver en la tabla 6, el rendimiento respecto a la remoción de la turbidez aumenta en todos los casos ensayados, tanto a bajo, intermedio y alto nivel de turbidez en el agua. Aumentando del 13,28 % al 49.50% para la dosificación más baja. Sin embargo, los mejores rendimientos se alcanzan con niveles altos de turbidez en este caso 670 NTU

Una vez establecidos los rangos óptimos de las dosificaciones, se trabajó con una muestra de agua de río con una turbidez inicial de 117 NTU, como se puede ver en la tabla 7, todos los tratamientos tuvieron una remoción próxima al 80% de la turbidez y se observó una

elevación leve del pH de hasta un 5.0%. Los tratamientos con sulfato de aluminio alcanzaron un rendimiento de casi el 99% en todas las dosificaciones ensayadas.

**Tabla 7: Resultados remoción de turbidez en muestras de agua de río en la prueba de jarras con mucílago y sulfato de aluminio**

Dosis mucílago (mg/L)	Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	% remoción	pH inicial	pH final	% variación pH <sup>a</sup>
15		117.00±2.08	26.10±0.47	77.7±0,40	6.56±0.12	6.74±0.17	----
25			24.42±1.60	79.14±1.38		6.90±0.18	----
35			22.90±1.35	80.40±1.16		6.86±0.09	----
45			25.81±1.19	77.90±1.02		6.88±0,14	----
	15	120.20±2.51	1.41±0.02	98.83±0.02	7.22±0.35	6.69±0.17	7.24±1.36
	25		1.38±0.05	98.86±0.04		6.53±0.13	9.28±1.82
	35		1.32±0.11	98.89±0.09		6.43±0.34	10.9±2.03
	45		1.29±0.09	98.90±0.08		6.27±0.27	13.2±3.75

<sup>a</sup> En los ensayos con mucílago el pH se incrementó levemente en todos los casos por lo que la variación sería negativa.

## 4. Discusión

### 4.1 Eficiencia de coagulación dependiente de la dosis

Los resultados de eficiencia porcentual en la remoción de turbidez en las muestras de agua sintética de baja turbidez (aproximadamente 50 NTU) (tabla 2) denotan una tendencia asintótica de remoción de partículas a medida que aumenta la dosis de mucílago, si bien incrementa la remoción no lo hace en proporción al aumento de la dosis del coagulante. Nuestros resultados coinciden con lo presentado por Otálora y colaboradores, (2022) la explicación dada por su equipo de investigación puede ser aplicable a nuestro caso y es la de atribuir este fenómeno a un proceso de recubrimiento de la superficie de las partículas por los polisacáridos solubles del mucílago, lo que disminuiría el número de sitios de adsorción activos comprometiendo el proceso de formación de partículas coloidales/cadena de polisacáridos y partículas coloidales/cadena de polisacáridos/complejos.

Por otro lado, el añadido de una pequeña cantidad de sulfato de aluminio al 1%, 5 mg/L, incrementa la eficiencia en la remoción de turbidez sin promover la disminución del pH característica de los tratamientos con dosis mayores del sulfato. Sin embargo, este incremento en el porcentaje de eficiencia de hasta en un 77% no es suficiente como para alcanzar valores aceptables de turbidez en el agua tratada. No hemos podido encontrar en la bibliografía ensayos en los que se use el mucílago de tuna como bio-coagulante para tratar aguas de baja turbidez como las de nuestro primer ensayo (tabla 2) sino únicamente para remover niveles elevados de turbidez en aguas tanto naturales como residuales (Meza-Leones et al., 2018; Parra et al., 2011; Pichler et al., 2012)

Nuestros resultados también muestran un incremento en la eficiencia de remoción de turbidez con el aumento de esta, así para una turbidez inicial de 175 NTU la eficiencia osciló entre 80.6% y 81.9%, tras un proceso de filtrado se logró reducir la turbidez por debajo de 5 NTU que corresponde a eficiencias de entre 97.1 a 97.5%. Sin que se comprometa los

valores de pH que se mantuvieron dentro de los rangos esperados para agua de consumo. Resultados similares fueron reportados por Otálora et al., (2022) para concentraciones de 12 ppm de mucílago de *Opuntia ficus-indica* y por Parra et al. (2011), para otra cactácea *Opuntia wentiana* pero con concentraciones más altas de mucílago de entre 600 a 700 ppm. En los ensayos con turbidez inicial entre 678 y 683 NTU se evidenció con mayor intensidad el efecto asintótico de aumento de la eficiencia de remoción de turbidez (Otálora et al., 2022), no habiendo diferencias significativas entre los valores de porcentajes de remoción con 70 mg/L de los de 100 mg/L. En este caso la adición de el sulfato de aluminio aumento muy poco el porcentaje de remoción.

El aumento de la concentración de la solución de mucílago de 1 al 2% incrementa el poder coagulante-floculante del mucílago, estos resultados están alineados a los reportados en la bibliografía para concentraciones de 300 a 700 ppm (Parra et al., 2011; Pichler et al., 2012)

Las muestras de agua de río, con turbidez de entre 117 a 120, mostraron que la dosis óptima del coagulante es de 35 mg/L de solución de mucílago al 1% con una eficiencia de remoción del 80%. Sin embargo, para alcanzar los valores de turbidez recomendados para agua de consumo se requiere de una etapa posterior de filtración. Parra et al., (2011) para similares rangos de turbidez reportaron eficiencias de remoción de entre 85.25 y 94.84% empleando concentraciones de mucílago de 600 a 700 ppm, que son varios ordenes superiores a las ensayadas en este trabajo.

## 5. Conclusiones

Este trabajo demostró la efectividad del mucílago obtenido de las hojas de *Opuntia ficus-indica* como coagulante primario para la remoción de turbiedad en aguas turbias sintéticas y en aguas superficiales, los resultados para bajos valores de turbidez alcanzan hasta un 26,1% y se incrementa con la adición de una dosis de 5.0 mg/L de sulfato de aluminio hasta 58,8% o duplicando la concentración del mucílago al 2% hasta 49.50% sin comprometer la variación del pH. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen con valores de turbidez inicial alrededor de 120 NTU que corresponden a los escenarios más comunes en aguas de río, en estos casos la eficiencia supera el 80% y tras una etapa de filtración alcanza el 97%. Estos resultados hacen prometedor el uso del mucílago extraído de la tuna *Opuntia ficus-indica* en comunidades rurales que carecen de sistemas de tratamiento de agua para consumo, por la simplicidad y coste accesible de la tecnología y principalmente porque el mucílago puede ser obtenidos de plantas que crecen en la zona.

## Referencias

- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Ramanan, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.024>
- Cooperación Alemana para el Desarrollo con Bolivia. (2019). *Agua potable y saneamiento básico*. [www.bmz.de](http://www.bmz.de)
- De Souza, M. T. F., Ambrosio, E., De Almeida, C. A., De Souza Freitas, T. K. F., Santos, L. B., De Cinque Almeida, V., & Garcia, J. C. (2014). The use of a natural coagulant (*Opuntia ficus-indica*) in the removal for organic materials of textile effluents. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(8), 5261–5271. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3775-9>

- Flaten, T. P. (2001). Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Research Bulletin*, 55(2), 187–196.
- Gurdián López, R., & Coto Campos, J. M. (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.
- Igbokwe, I. O., Igwenagu, E., & Igbokwe, N. A. (2019). Aluminium toxicosis.pdf. *Interdiscip Toxicol.*, 12(2), 45–70.
- Jerri, H. A., Adolfsen, K. J., McCullough, L. R., Velegol, D., & Velegol, S. B. (2012). Antimicrobial Sand via Adsorption of Cationic Moringa oleifera Protein. *Langmuir*, 28(4), 2262–2268. <https://doi.org/10.1021/la2038262>
- Meza-Leones, M., Riaños Donado, K., Mercado Martínez, I., Olivero Verbel, R., & Jurado Eraso, M. (2018). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleifera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 95–104. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018009>
- Miller, S. M., Fugate, E. J., Craver, V. O., Smith, J. A., & Zimmerman, J. B. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science and Technology*, 42(12), 4274–4279. <https://doi.org/10.1021/es7025054>
- Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Castaño, J. A. G., & Cifuentes, G. R. (2022). *Evaluation of Turbidity and Color Removal in Water Treatment: A Comparative Study between Opuntia ficus-indica Fruit Peel Mucilage and FeCl<sub>3</sub>*. <https://doi.org/10.3390/polym>
- Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y., & Fuentes, L. (2011). *Clarificación de Aguas de Alta Turbidez Empleando el Mucílago de Opuntia wentiana (Britton & Rose) (Cactaceae)* (Vol. 1).
- Pichler, T., Young, K., & Alcantar, N. (2012). Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus. *Water Science and Technology: Water Supply*, 12(2), 179–186. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.126>
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). *Opuntia* spp. mucilage's: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57(3), 275–290. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00106-X)
- Šćiban, M., Klačnja, M., Antov, M., & Škrbić, B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*, 100(24), 6639–6643. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.047>
- Villabona Ortiz, Á., Cristina Paz Astudillo, I., & Martínez García, J. (2013). Caracterización de *Opuntia ficus-indica* para coagulante natural Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant. In *Rev. Colomb. Biotecnol* (Issue 1).
- Yin, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. In *Process Biochemistry* (Vol. 45, Issue 9, pp. 1437–1444). <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

