

Evaluación Experimental de la Reducción de Conductividad Eléctrica Mediante Biopolímeros Derivados de Mucílagos Vegetales

Emmanuel Rivera-Cortes ¹, Daniela Guadalupe Ruiz-Solis ¹, Ernesto Sebastián Cuellar-Hinojosa ¹, Celia de Jesús Lizardi-Conti ¹, Tomas Lozano-Ramírez ¹, Juan Jesús Reyes-Valdez ², y Luisiana Morales-Zamudio ^{1,*}

¹ Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Departamento de Ingeniería Química, Av. Primero de Mayo S/N, Col. Los Mangos, Cd. Madero 89440, Tamaulipas, México.

² EPM del SECIHTI-Instituto Politécnico Nacional-Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira Km. 14.5, Altamira 89600, Tamaulipas, México.

* Autores de correspondencia: luisiana.mz@cdmadero.tecnm.mx

Contaminación del agua, el suelo y el aire (Procesos fisicoquímicos)

Recibido: 19 de marzo de 2026

Aceptado: 16 de julio de 2026

Publicado: 2 de agosto de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.693>

Resumen: En este estudio se evaluó experimentalmente el potencial de diferentes mucílagos vegetales como bioadsorbentes naturales para la reducción de la conductividad eléctrica y de la salinidad estimada en agua de mar y soluciones patrón de salmuera. Se emplearon biomateriales ricos en polisacáridos obtenidos de nopal (*Opuntia* spp.), jacabe (*Acanthocereus tetragonus*), sábila (*Aloe vera*), moringa (*Moringa oleifera*) y linaza (*Linum usitatissimum*). Los experimentos se realizaron utilizando soluciones patrón de salmuera y agua de mar recolectada en la playa Miramar de Ciudad Madero, Tamaulipas, México, con conductividades eléctricas iniciales entre 73,000 y 75,000 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. El tratamiento consistió en ciclos sucesivos de mezcla, adsorción y separación del complejo entre el mucílago y las sales, seguidos de una etapa de precipitación del biopolímero con etanol para su remoción del agua tratada y posterior recuperación del disolvente. Los resultados mostraron una reducción significativa de la conductividad eléctrica en todos los tratamientos evaluados, alcanzándose disminuciones superiores al 92 %. Las especies cactáceas presentaron el mejor desempeño, particularmente el nopal, que alcanzó reducciones de conductividad de hasta 98.09 % en agua de mar, con una conductividad eléctrica final de 1,435 $\mu\text{S/cm}$, y de 98.43 % en salmuera, con una conductividad eléctrica final de 1,147 $\mu\text{S/cm}$. Debido a que no se determinaron las concentraciones individuales de los principales iones presentes en solución, los resultados se interpretaron como una estimación indirecta de la reducción de salinidad basada en la conductividad eléctrica. Asimismo, se observaron disminuciones moderadas del pH hacia valores ligeramente ácidos (≈ 5.0 – 6.5), lo que sugiere interacciones entre los grupos funcionales del mucílago y los cationes presentes en la solución. Estos resultados mostraron que los mucílagos vegetales poseen potencial para reducir la conductividad eléctrica de soluciones salinas y sugieren que este efecto podría estar asociado a una combinación de mecanismos de adsorción iónica, intercambio catiónico, floculación coloidal y exclusión Donnan dentro de la matriz polimérica. Estos hallazgos destacaron el potencial de los mucílagos vegetales como materiales renovables y de bajo costo para el desarrollo de procesos sostenibles de tratamiento de agua y disminución de la salinidad estimada mediante la conductividad eléctrica.

Palabras clave: mucílago, bioadsorbente, reducción de salinidad, adsorción, conductividad eléctrica

Experimental Evaluation of Electrical Conductivity Reduction Using Biopolymers Derived from Plant Mucilages

Abstract: In this study, the potential of different plant mucilages as natural bioadsorbents for reducing electrical conductivity and estimated salinity in seawater and standard brine solutions was experimentally evaluated. Polysaccharide-rich biomaterials obtained from prickly pear cactus (*Opuntia* spp.), jacabe (*Acanthocereus tetragonus*), aloe vera (*Aloe vera*), moringa (*Moringa oleifera*), and flaxseed (*Linum usitatissimum*) were investigated. The experiments were conducted using standard brine solutions and seawater collected from Miramar Beach in Ciudad Madero, Tamaulipas, Mexico, with initial electrical conductivities ranging from 73,000 to 75,000 $\mu\text{S/cm}$, respectively. The treatment consisted of successive cycles of mixing, adsorption, and separation of the complex between the mucilage and the salts, followed by precipitation of the biopolymer with ethanol for its removal from the treated water and subsequent solvent recovery. The results showed a significant reduction in electrical conductivity for all treatments evaluated, achieving decreases greater than 92%. The cactus species exhibited the best performance, particularly prickly pear cactus, which achieved conductivity reductions of up to 98.09% in seawater, reaching a final electrical conductivity of 1,435 $\mu\text{S/cm}$, and 98.43% in brine solution, with a final electrical conductivity of 1,147 $\mu\text{S/cm}$. Since the individual concentrations of the major ions present in solution were not determined, the results were interpreted as an indirect estimate of salinity reduction based on electrical conductivity measurements. In addition, moderate decreases in pH toward slightly acidic values (≈ 5.0 – 6.5) were observed, suggesting interactions between mucilage functional groups and the cations present in solution. These results demonstrated that plant mucilages possess a high capacity to reduce the electrical conductivity of saline solutions and suggest that this effect may be associated with a combination of ionic adsorption,

cation exchange, colloidal flocculation, and Donnan exclusion mechanisms within the polymeric matrix. These findings highlight the potential of plant mucilages as renewable and low-cost materials for the development of sustainable water treatment processes and the reduction of salinity as estimated by electrical conductivity measurements.

Keywords: mucilage, bioadsorbent, salinity reduction, adsorption, electrical conductivity

Introducción

La disponibilidad de agua dulce constituye uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI. El crecimiento poblacional, la intensificación de la actividad agrícola e industrial y los efectos del cambio climático han incrementado significativamente la presión sobre los recursos hídricos disponibles, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Xu *et al.*, 2025; Zhang & Wang, 2024).

Como consecuencia, la desalinización de aguas salinas y marinas ha adquirido un papel estratégico en la seguridad hídrica global. Sin embargo, las tecnologías convencionales de desalinización, como la ósmosis inversa y los procesos térmicos, presentan elevados requerimientos energéticos, altos costos operativos y potenciales impactos ambientales asociados a la descarga de salmueras concentradas (Ben Rouane *et al.*, 2025; Panagopoulos, 2025; Sirota *et al.*, 2024).

En respuesta a estas limitaciones, existe un creciente interés en el desarrollo de tecnologías alternativas basadas en materiales naturales y procesos de bajo consumo energético para el tratamiento de agua (Abdelhamid, 2025; González Avilez *et al.*, 2024; Kasbaji *et al.*, 2023). Entre estas alternativas destacan los biopolímeros vegetales, particularmente aquellos ricos en polisacáridos hidrofílicos, los cuales poseen una elevada capacidad de interacción con contaminantes y especies iónicas presentes en soluciones acuosas (Alsaka *et al.*, 2025; Chelu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023b).

Los mucílagos vegetales son biopolímeros complejos compuestos principalmente por heteropolisacáridos de alto peso molecular que contienen azúcares neutros como arabinosa, galactosa, ramnosa y xilosa, así como ácidos urónicos, entre ellos ácido galacturónico y ácido glucurónico. Estos componentes confieren a la matriz polimérica propiedades de polielectrolito aniónico, lo que favorece su interacción con cationes presentes en el agua mediante mecanismos de adsorción, intercambio iónico y floculación coloidal (González Avilez *et al.*, 2024; Otálora *et al.*, 2022).

Diversos estudios han demostrado que el mucílago extraído de especies del género *Opuntia* presenta características fisicoquímicas favorables para aplicaciones en tratamiento de agua. La presencia de grupos funcionales hidroxilo y carboxilo en su estructura molecular permite la formación de interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno con especies iónicas o partículas coloidales presentes en el agua, favoreciendo su agregación y posterior separación (González Avilez *et al.*, 2024; Otálora *et al.*, 2023).

Además, debido a la elevada longitud de sus cadenas de polisacáridos, el mucílago puede actuar como un agente de floculación por puenteo, mediante el cual las macromoléculas poliméricas se adsorben simultáneamente sobre múltiples partículas o especies iónicas en solución, conectándolas entre sí y formando agregados de mayor tamaño que pueden ser removidos por sedimentación o centrifugación (Konkobo *et al.*, 2024).

Aunque numerosos estudios han evaluado el uso de mucílagos vegetales como coagulantes naturales para la remoción de turbidez, metales pesados y contaminantes orgánicos, su aplicación directa en procesos de reducción de conductividad eléctrica en agua de mar ha sido relativamente poco explorada. La mayoría de las investigaciones se han centrado en la eliminación de contaminantes específicos, mientras que los mecanismos de interacción entre los polisacáridos del mucílago y los iones predominantes en agua de mar, como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), aún requieren mayor estudio experimental.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar experimentalmente la capacidad de diferentes mucílagos vegetales como bioadsorbentes naturales para reducir la salinidad del agua de mar y de soluciones salinas, empleando la conductividad eléctrica como un indicador indirecto de salinidad. En la evaluación experimental no se caracterizó la muestra de agua de mar para cuantificar cada ión presente y la solución patrón (salmuera) se preparó con una sal conocida por estar presente en el agua de mar, con una concentración de inicio conocida. En ambas muestras se determinó la conductividad eléctrica inicial, durante y final de las etapas del proceso para cada una de las

especies empleadas. Los resultados se interpretaron como una estimación indirecta de la disminución de salinidad inferida a partir de la conductividad eléctrica. Por consiguiente, no se concluye la remoción específica de las sales presentes en el agua de mar, ni el grado de remoción de cada una.

Materiales y Métodos

El proceso de reducción de conductividad eléctrica y disminución estimada de salinidad se llevó a cabo mediante adsorción física utilizando mucílago proveniente de biomasa vegetal con alto contenido de polisacáridos hidrofílicos. Para ello se emplearon especies productoras de mucílago como nopal, jacube, sábila, moringa y linaza, seleccionadas por su capacidad natural de interacción con iones disueltos. Como medio de referencia se prepararon soluciones patrón de cloruro de sodio (NaCl) en agua destilada, mientras que para la precipitación y separación del mucílago residual después del tratamiento se utilizó etanol al 98 % de pureza (Sigma-Aldrich®, St. Louis, MO, Estados Unidos). Adicionalmente, se empleó agua de mar recolectada en la playa Miramar de Ciudad Madero, Tamaulipas, México, como muestra representativa de alta salinidad para la evaluación experimental del proceso.

Preparación y acondicionamiento de la biomasa

Para la obtención del mucílago se emplearon cladodios frescos de nopal (*Opuntia spp.*), tallos frescos de jacube (*Acanthocereus tetragonus*), gel interno fresco de hojas de sábila (*Aloe vera*), semillas secas de moringa (*Moringa oleifera*) y de linaza (*Linum usitatissimum*). Todos los materiales vegetales fueron recolectados o adquiridos localmente y utilizados en las condiciones descritas para favorecer la liberación de los polisacáridos responsables de la formación del mucílago.

La biomasa vegetal fue sometida inicialmente a un proceso de limpieza mediante lavado con agua de mar para eliminar partículas sólidas e impurezas superficiales, y con el propósito de evitar fenómenos de dilución que pudieran alterar artificialmente la conductividad eléctrica inicial de las muestras. De esta manera se minimizó la incorporación de agua dulce al sistema experimental y se redujo la posibilidad de introducir sesgos en la evaluación de la reducción de conductividad eléctrica.

Durante el lavado se aplicó agitación mecánica de 100 rpm durante aproximadamente 15 minutos. Posteriormente, el material se dejó en reposo por 5 minutos para permitir la sedimentación de sólidos y eliminándose el agua de lavado por decantación. Finalmente, la biomasa se escurrió por gravedad.

Trituración y liberación del mucílago

La biomasa limpia se trituró mecánicamente en presencia de una fracción del agua a tratar para extraer el mucílago con equipos resistentes a la corrosión. La concentración de biomasa utilizada fue de 20, 30, 40 y 50 % peso para nopal, jacube y sábila, mientras que para la linaza y la moringa las concentraciones utilizadas fueron de 3, 6 y 9 % peso, respecto al volumen total de 1 L de agua a tratar.

En la etapa de trituración se añadió aproximadamente el 20 % del volumen total del agua salina con el fin de facilitar la homogenización y favorecer la liberación del mucílago contenido en los tejidos vegetales. Este proceso se realizó durante 10 minutos, a una temperatura aproximada de 25 a 30 °C, obteniéndose una suspensión homogénea rica en mucílago.

Mezcla y proceso de adsorción

La suspensión resultante se transfirió a un tanque de mezcla donde se adicionó el 80 % restante del agua a tratar. La mezcla se sometió a agitación mecánica a 100 rpm durante 20 minutos, manteniendo la temperatura entre 20 y 25 °C.

Para evaluar la reproducibilidad del método y reducir la variabilidad experimental, cada ensayo se efectuó por triplicado bajo las mismas condiciones operativas. Los valores reportados corresponden al promedio de las mediciones obtenidas para cada tratamiento.

Durante esta etapa pudieron ocurrir fenómenos fisicoquímicos de adsorción iónica, intercambio iónico, exclusión Donnan, floculación coloidal y atrapamiento físico de sales disueltas dentro de la matriz polimérica del mucílago, los cuales podrían favorecer la formación de complejos entre el mucílago y las sales asociados a fibras vegetales, con una densidad aparente mayor que la del medio líquido.

Sedimentación y separación

Una vez finalizada la etapa de mezcla, la suspensión se dejó en reposo por 30 minutos para permitir la sedimentación del complejo entre el mucílago y las sales. El material sólido formado se separó de la fase líquida mediante centrifugación mecánica por 1 min a 4000 rpm con una centrifuga de la marca Fnbri modelo 800-1 (país de origen, China), obteniéndose una fase líquida con menor conductividad eléctrica y un sólido concentrado compuesto por mucílago y especies retenidas.

Repetición cíclica del proceso

Con el objetivo de incrementar la reducción estimada de salinidad basada en conductividad eléctrica, las etapas de mezcla, reposo y separación se realizaron por tres ciclos. La reducción de salinidad se monitoreó mediante mediciones de conductividad eléctrica del agua tratada, considerándose que el proceso alcanzó su máxima eficiencia cuando la variación de conductividad entre ciclos fue menor al 5 % o cuando la conductividad final fue inferior a 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Precipitación del mucílago residual

El mucílago residual presente en el agua tratada se eliminó mediante precipitación con etanol. Para 1 L de agua tratada se utilizaron 2 L de etanol, seguida de agitación mecánica a 300 rpm durante 10 minutos a una temperatura entre 20 y 25 °C. Posteriormente, la mezcla se dejó reposar por 10 minutos para permitir la sedimentación del mucílago precipitado, el cual se separó por decantación.

Recuperación del disolvente y obtención de agua tratada con conductividad eléctrica reducida

La fase líquida hidroalcohólica obtenida fue sometida a destilación convencional a presión atmosférica empleando una columna de destilación de platos a escala de laboratorio.

La eficiencia de recuperación de etanol se calculó mediante la Ecuación 1:

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{DX_D}{FX_F} \times 100 \quad (1)$$

donde D corresponde al destilado rico en etanol, x_D es la fracción molar del destilado, F es la alimentación y x_F es la fracción molar de la alimentación.

En pruebas preliminares se obtuvo una recuperación cercana al 98 % de etanol para su reutilización en el sistema y obtener como producto una corriente de agua tratada con conductividad eléctrica reducida respecto a la muestra inicial.

Evaluación del proceso

La eficiencia del procedimiento se evaluó mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos del agua antes y después del tratamiento. Se midieron principalmente la conductividad eléctrica y el pH utilizando un medidor Yunduo modelo PH-01. Los ensayos se realizaron tanto con agua de mar como con soluciones patrón de cloruro de sodio, con el propósito de evaluar la capacidad de reducción de salinidad bajo condiciones controladas. La eficiencia de reducción de la conductividad eléctrica se calculó mediante la siguiente Ecuación 2:

$$\text{Reducción (\%)} = \frac{\sigma_i - \sigma_f}{\sigma_i} \times 100 \quad (2)$$

donde (σ_i) corresponde a la conductividad eléctrica inicial de la muestra y (σ_f) a la conductividad eléctrica final obtenida después del tratamiento. Este parámetro se utilizó como un indicador indirecto de la disminución de salinidad bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Los resultados obtenidos durante los tratamientos se interpretaron como una estimación indirecta de la reducción de salinidad basada en la conductividad eléctrica. Debido a que el presente estudio no incluyó la determinación individual de los principales iones presentes en solución, los porcentajes de reducción reportados corresponden exclusivamente a cambios en la conductividad eléctrica y no constituyen una cuantificación directa de la remoción de especies iónicas específicas.

Resultados y Discusión

Los experimentos realizados permitieron evaluar la capacidad de diferentes mucílago vegetales para reducir la conductividad eléctrica del agua de mar mediante un proceso basado en adsorción y floculación con biopolímeros naturales. Los mucílago obtenidos de nopal, jacube y sábila presentaron una reducción significativa de la conductividad eléctrica durante los ciclos de lavado, observándose una mejora progresiva de la eficiencia conforme aumentó la concentración de biomasa empleada.

El nopal mostró el mejor desempeño entre las especies evaluadas, alcanzando una conductividad eléctrica final de 1,435 $\mu\text{S/cm}$ y una reducción total de 98.09 % a una concentración de 50 %. De manera similar, el jacube registró una conductividad final de 1,894 $\mu\text{S/cm}$ y una reducción de 97.47 %, mientras que la sábila alcanzó una conductividad final de 1,724 $\mu\text{S/cm}$ con una reducción de 97.70 % bajo la misma concentración.

Los mucílago derivados de semillas, moringa y linaza, también mostraron una disminución progresiva de la conductividad eléctrica durante los ciclos de lavado, aunque con eficiencias ligeramente inferiores a las observadas en las especies cactáceas. En ambos casos, el incremento de la concentración de mucílago mejoró el desempeño del tratamiento.

Para la moringa, la conductividad final disminuyó de 3,241 $\mu\text{S/cm}$ a 2,541 $\mu\text{S/cm}$ al aumentar la concentración de 3 % a 9 %, alcanzándose una reducción máxima de 96.61 %. Por su parte, la linaza presentó conductividades finales entre 3,740 y 2,817 $\mu\text{S/cm}$, con una reducción máxima de 96.24 % a una concentración de 9 %. La moringa mostró un desempeño ligeramente superior al de la linaza, aunque las diferencias observadas fueron relativamente pequeñas. Sin embargo, las especies cactáceas presentaron las mayores eficiencias de reducción de conductividad eléctrica, siendo el nopal la especie con mejor desempeño bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Los resultados sugieren que los mucílago vegetales mostraron capacidad para disminuir significativamente la conductividad eléctrica del agua de mar; sin embargo, debido a que la evaluación se realizó mediante este parámetro, los resultados se interpretaron como una reducción experimental de salinidad estimada mediante conductividad eléctrica y no como una cuantificación directa de la remoción de especies iónicas específicas.

La verificación de la remoción selectiva de iones requerirá estudios complementarios mediante técnicas analíticas como cromatografía iónica o espectroscopía de absorción atómica, las cuales no formaron parte del alcance del presente trabajo. La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos en agua de mar utilizando mucílago provenientes de especies cactáceas (nopál, jacube y sábila) y de especies no cactáceas (moringa y linaza) después de los ciclos sucesivos de tratamiento.

Tabla 1. Resultados de conductividad eléctrica en agua de mar empleando diversas especies de mucílago a diferentes concentraciones

Especie	Concentración (%)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)		Reducción total (%)
		Sin lavado	Lavado final con etanol	
Nopal	20	75,000	3,400	95.47
	30	75,000	3,000	96.00
	40	75,000	2,361	96.85
	50	75,000	1,435	98.09
Jacube	20	75,000	3,500	95.33
	30	75,000	3,256	95.66
	40	75,000	2,247	97.00
	50	75,000	1,894	97.47
Sábila	20	75,000	3,603	95.20
	30	75,000	3,124	95.84
	40	75,000	2,200	97.07
	50	75,000	1,724	97.70
Moringa	3	75,000	3,241	95.68
	6	75,000	2,994	96.00
	9	75,000	2,541	96.61
Linaza	3	75,000	3,740	95.01
	6	75,000	3,654	95.13
	9	75,000	2,817	96.24

La influencia de la concentración de mucílago en solución patrón se presentan en la Tabla 2. En términos generales, los mucílagos provenientes de especies cactáceas (nopal, jacube y sábila) mostraron una relación directa entre el incremento de la concentración de biomasa y la eficiencia del tratamiento. A medida que aumentó la concentración de mucílago, la conductividad final disminuyó progresivamente, alcanzándose las mayores reducciones con concentraciones de 50 %.

Este comportamiento sugiere que el incremento en la cantidad de biopolímero aumenta el número de sitios activos disponibles para la interacción con las especies iónicas presentes en la solución, lo cual ha sido ampliamente reportado para adsorbentes naturales utilizados en el tratamiento de agua (Ahmed, 2015; Crini & Lichtfouse, 2019; Rinaudo, 2008).

Los mucílagos derivados de semillas, como moringa y linaza, también demostraron capacidad para reducir la conductividad de la solución salina, aunque su eficiencia fue ligeramente menor en comparación con las especies cactáceas. En el caso de la moringa, las reducciones obtenidas oscilaron entre 94.63 y 95.68 %, registrándose la mejor condición a una concentración de 3 %, con una conductividad eléctrica final de 3,155 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De manera similar, la linaza presentó reducciones entre 94.92 y 95.13 %, alcanzando su mejor desempeño a una concentración de 6 %, con una conductividad final de 3,557 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Las diferencias observadas entre las especies evaluadas podrían atribuirse a variaciones en la composición química y en la estructura molecular de los polisacáridos presentes en cada mucílago (Haseeb *et al.*, 2024; Rasheed *et al.*, 2023). Los mucílagos de cactus contienen altas concentraciones de ácidos urónicos y polisacáridos ramificados que proporcionan una mayor densidad de grupos funcionales activos, lo que favorecería la interacción con los cationes presentes en el agua (Javed *et al.*, 2024; León Martínez & Cano Barrita, 2024). Esta característica podría explicar la reducción de conductividades finales obtenidas para nopal, jacube y sábila en comparación con moringa y linaza.

Tabla 2. Resultados de conductividad eléctrica en solución patrón (salmuera) empleando diversas especies de mucílago a diferentes concentraciones

Especie	Concentración (%)	Conductividad eléctrica (µS/cm)		Reducción total (%)
		Sin lavado	Lavado final con etanol	
Nopal	20	73,000	3,266	95.53
	30	73,000	2,882	96.05
	40	73,000	2,268	96.89
	50	73,000	1,147	98.43
Jacube	20	73,000	5,283	92.77
	30	73,000	3,554	95.14
	40	73,000	2,401	96.71
	50	73,000	1,153	98.42
Sábila	20	73,000	4,034	94.48
	30	73,000	3,074	95.79
	40	73,000	2,017	97.24
	50	73,000	1,537	97.90
Moringa	3	73,000	3155	95.68
	6	73,000	3925	94.63
	9	73,000	3425	95.31
Linaza	3	73,000	3,638	95.01
	6	73,000	3,557	95.13
	9	73,000	3,712	94.92

Los resultados obtenidos tanto en agua de mar como en solución patrón (salmuera) evidenciaron una disminución significativa de la conductividad eléctrica bajo las condiciones experimentales evaluadas. Las especies cactáceas, particularmente el nopal, presentaron las mayores eficiencias de reducción, mientras que los mucílagos derivados de semillas también mostraron un desempeño favorable, aunque ligeramente inferior. Adicionalmente, la concentración de mucílago constituyó un factor importante en la eficiencia del proceso, especialmente en las especies cactáceas, donde el incremento de biomasa se asoció con una mejora consistente en la reducción de la conductividad eléctrica.

La Tabla 3 presenta los valores de pH en agua de mar obtenidos durante los ciclos sucesivos de lavado en presencia de diferentes mucílagos vegetales y a distintas concentraciones. Los resultados mostraron una disminución progresiva del pH desde valores cercanos a la neutralidad ($\approx 6.8 - 7.0$) hacia valores ligeramente ácidos, alcanzando intervalos aproximados entre 5.0 y 6.5 a lo largo del proceso. En el caso del nopal se observó que el incremento de la concentración de mucílago favoreció una mayor disminución del pH durante los ciclos de tratamiento. A concentraciones de 20 % el pH descendió de 7.00 a aproximadamente 6.20 en el lavado final, mientras que a concentraciones de 50 % el pH alcanzó valores cercanos a 5.70. Este comportamiento sugiere que el aumento en la cantidad de biopolímero incrementa la disponibilidad de grupos funcionales activos capaces de participar en procesos de interacción química con los iones presentes en la solución salina.

Un comportamiento similar se observó en el caso del jacube y la sábila, donde la disminución del pH también se volvió más pronunciada conforme aumentó la concentración del mucílago. Sin embargo, las variaciones observadas son ligeramente menores que las registradas para el nopal, lo que podría indicar diferencias en la composición química o en la densidad de grupos funcionales presentes en los polisacáridos de cada especie. En contraste, los mucílagos derivados de semillas, como los obtenidos de moringa y linaza, mostraron un comportamiento ligeramente distinto. En estos casos el descenso del pH ocurrió principalmente durante el primer ciclo de lavado, seguido de una estabilización relativa en los ciclos posteriores. Por ejemplo, en el caso de la moringa el pH inicial de 7.00 disminuyó rápidamente hasta valores cercanos a pH = 5.0 después del primer lavado, manteniéndose posteriormente en un rango

relativamente estable entre un pH de 5.0 y 5.5. Esta tendencia sugiere que los procesos de interacción entre el mucílago y los cationes presentes en la solución ocurren principalmente durante las primeras etapas del tratamiento.

Tabla 3. Resultados de pH en agua de mar empleando diversas especies de mucílago a diferentes concentraciones durante los procesos de lavado

Especie	Concentración (%)	pH	
		Inicial	Lavado final con etanol
Nopal	20	7.00	6.20
	30	6.90	6.00
	40	7.00	5.80
	50	6.90	5.70
Jacube	20	6.90	6.30
	30	7.00	6.10
	40	6.80	5.90
	50	6.90	5.80
Sábila	20	7.00	6.30
	30	6.90	6.20
	40	7.00	6.00
	50	6.80	5.80
Moringa	3	7.00	5.51
	6	7.00	5.11
	9	7.00	5.24
Linaza	3	7.00	5.55
	6	7.00	5.63
	9	7.00	5.90

La disminución observada del pH podría explicarse por la participación de procesos de intercambio iónico entre los grupos funcionales del mucílago y los cationes presentes en la solución salina. Durante este mecanismo, los protones asociados a los grupos carboxilo ($-\text{COOH}$) del biopolímero son liberados al medio cuando los cationes de la solución se unen a la matriz polimérica. La liberación de protones provoca una ligera acidificación del sistema, lo que se refleja en los valores de pH registrados durante los ciclos de tratamiento. Fenómenos similares han sido reportados previamente en el uso de coagulantes naturales derivados de plantas aplicados al tratamiento de agua (Elsergany, 2023; Okuda *et al.*, 2001).

La Tabla 4 muestra los valores de pH en solución patrón (salmuera) registrados durante los ciclos de tratamiento en un segundo conjunto de experimentos realizados con los mismos mucílagos vegetales. En las especies cactáceas, particularmente nopal, jacube y sábila, el pH inicial cercano a la neutralidad disminuyó gradualmente conforme avanzaron los tratamientos. En el caso del nopal, el pH inicial de aproximadamente 6.8 descendió hasta valores cercanos de 4.9–5.3 en los ciclos intermedios cuando se emplearon concentraciones elevadas de mucílago (50%). Posteriormente, durante el lavado final con etanol, se observó una ligera recuperación del pH, lo cual puede estar asociado a la eliminación parcial del mucílago y de los complejos formados con los iones.

El jacube y la sábila mostraron un comportamiento similar, aunque con descensos de pH ligeramente menos pronunciados. Este resultado podría estar relacionado con diferencias estructurales en los polisacáridos presentes en cada mucílago, lo que influye en la capacidad de interacción con las especies iónicas presentes en el agua.

En las especies derivadas de semillas, los resultados mostraron variaciones más moderadas del pH durante los ciclos de tratamiento. En estos casos, el pH disminuyó principalmente durante el primer lavado y posteriormente se mantuvo relativamente estable. En particular, la linaza presentó los valores de pH más cercanos a la neutralidad entre todas las

especies evaluadas, lo que sugiere que sus polisacáridos poseen una menor densidad de grupos funcionales ácidos capaces de liberar protones al medio.

Tabla 4. Resultados de pH en solución patrón (salmuera) empleando diversas especies de mucílago a diferentes concentraciones durante los procesos de lavado

Especie	Concentración (%)	pH	
		Inicial	Lavado final con etanol
Nopal	20	6.80	5.80
	30	6.80	5.60
	40	6.70	5.50
	50	6.80	5.30
Jacube	20	6.70	6.00
	30	6.80	5.70
	40	6.60	5.50
	50	6.70	5.40
Sábila	20	6.80	6.00
	30	6.70	5.90
	40	6.80	5.60
	50	6.90	5.50
Moringa	3	6.90	6.10
	6	7.00	5.80
	9	6.90	5.90
Linaza	3	6.90	6.10
	6	7.00	6.20
	9	7.00	6.40

Debido a que el presente estudio no incluyó análisis de composición iónica, antes y después del tratamiento, los mecanismos propuestos se sustentaron en el comportamiento observado de la conductividad eléctrica, en las variaciones de pH registradas experimentalmente y en los antecedentes reportados en la literatura. Los resultados obtenidos sugieren que la disminución de la salinidad estimada mediante conductividad eléctrica podría estar asociada a la acción conjunta de diversos procesos fisicoquímicos.

Uno de los mecanismos potenciales correspondería a la adsorción electrostática de cationes sobre grupos funcionales presentes en los polisacáridos del mucílago. Diversos estudios han demostrado que los grupos carboxilato y los grupos hidroxilo presentes en biopolímeros naturales poseen capacidad para interactuar con especies iónicas disueltas mediante fuerzas electrostáticas y fenómenos de complejación superficial (Fakhri *et al.*, 2023; Rinaudo, 2008; Zheng *et al.*, 2024).

También pudo haber ocurrido un fenómeno de intercambio iónico, en el que los protones asociados a grupos carboxilo del mucílago sean reemplazados parcialmente por cationes presentes en la solución. Esta hipótesis es consistente con la ligera disminución de pH observada durante los tratamientos y con el comportamiento reportado para otros hidrogeles polielectrolíticos derivados de polisacáridos naturales (Ahmaruzzaman *et al.*, 2023; Ahmed, 2015).

Otro mecanismo potencial correspondería a la floculación por puenteo polimérico. Debido a su elevado peso molecular, las cadenas de polisacáridos del mucílago podrían adsorberse simultáneamente sobre diferentes partículas o agregados presentes en suspensión, favoreciendo la formación de estructuras de mayor tamaño y su posterior separación física. Este comportamiento ha sido reportado previamente para floculantes naturales derivados de polisacáridos vegetales (Raissouni *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023a).

Además, algunos autores han propuesto que los hidrogeles polielectrolíticos pueden generar fenómenos de exclusión Donnan, originados por la presencia de cargas fijas dentro de la matriz polimérica. Bajo estas condiciones, pueden producirse diferencias en la distribución de especies iónicas entre el interior del hidrogel y la solución circundante, favoreciendo procesos de retención selectiva de ciertos iones (Ahmaruzzaman *et al.*, 2023; Zimmerman *et al.*, 2025).

La elevada viscosidad característica de los mucílago vegetales también pudo favorecer procesos de atrapamiento físico dentro de la red polimérica, especialmente cuando se emplean concentraciones altas de biomasa, ya que, durante la agitación las cadenas de polisacáridos se expanden en la solución formando estructuras viscoelásticas que incrementan el tiempo de contacto entre los iones disueltos y los grupos funcionales activos del biopolímero favoreciendo potencialmente su retención.

La información presentada en las Tablas 1–4 sugiere que los mucílago vegetales no solo pudieron haber actuado como agentes adsorbentes de especies iónicas, sino que también participaron en procesos de intercambio químico con el medio acuoso. En particular, las variaciones de pH observadas en las Tablas 3 y 4 constituyen un indicador indirecto de la interacción entre los grupos funcionales del biopolímero y los cationes presentes en la solución salina, lo que podría contribuir a explicar el mecanismo de reducción de la salinidad observado en este estudio.

Con el fin de facilitar la comparación entre los mucílago evaluados, la Tabla 5 presenta las condiciones experimentales de mayor desempeño para cada especie vegetal, definidas como aquellas que alcanzaron la menor conductividad eléctrica final registrada durante los ensayos realizados con agua de mar o solución patrón de salmuera. Se incluyen además el porcentaje de reducción de conductividad eléctrica y el pH final registrado al término del tratamiento.

Tabla 5. Resumen de los mejores resultados de reducción de conductividad eléctrica obtenidos para cada especie vegetal bajo las condiciones experimentales evaluadas

Especie	Concentración (%)	Tipo de muestra	Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductividad final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Reducción (%)	pH final
Nopal	50	Salmuera	73,000	1,147	98.43	5.30
Jacube	50	Salmuera	73,000	1,153	98.42	5.40
Sábila	50	Salmuera	73,000	1,537	97.90	5.50
Moringa	9	Agua de mar	75,000	2,541	96.61	5.24
Linaza	9	Agua de mar	75,000	2,817	96.24	5.90

Los resultados resumidos en la Tabla 5 muestran que las especies cactáceas, particularmente nopal y jacube, alcanzaron las menores conductividades eléctricas finales y los mayores porcentajes de reducción estimada de conductividad bajo las condiciones experimentales evaluadas. En contraste, los mucílago derivados de semillas también mostraron reducciones importantes (>95 %), aunque con conductividades finales ligeramente superiores. Estas diferencias podrían estar relacionadas con variaciones en la composición química y la densidad de grupos funcionales presentes en los polisacáridos de cada especie vegetal. Con el propósito de contextualizar los resultados obtenidos, la Tabla 6 presenta una comparación entre el presente estudio y trabajos recientes que han evaluado mucílago vegetales en aplicaciones de tratamiento de agua.

La comparación con otros estudios muestra que los mucílago vegetales han sido empleados principalmente para la remoción de turbidez, color, materia orgánica y metales pesados. González Avilez *et al.* (2024) reportaron remociones de metales pesados de hasta 90.28 % mediante mucílago de *Opuntia ficus-indica* con diferente contenido de ácidos urónicos, mientras que Otálora *et al.* (2023) obtuvieron remociones de turbidez superiores al 94 % utilizando geles de mucílago como coagulantes naturales. Asimismo, Djerroud *et al.* (2023) reportaron una remoción máxima de DQO de 69.77 % en aguas residuales industriales mediante tratamientos asistidos con mucílago de *Opuntia ficus-indica*.

En contraste, el presente estudio evaluó directamente la reducción de conductividad eléctrica en agua de mar y soluciones salinas, observándose disminuciones superiores al 98 % bajo las condiciones experimentales empleadas. Aunque los parámetros evaluados difieren entre investigaciones, los resultados obtenidos son consistentes con la

capacidad ampliamente reportada de los mucílago vegetales para interactuar con especies presentes en medios acuosos mediante mecanismos de adsorción, floculación e intercambio iónico.

Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con investigaciones recientes sobre mucílago vegetales aplicados al tratamiento de agua.

Estudio	Material biopolimérico	Tipo de agua tratada	Parámetro evaluado	Resultado principal
Presente estudio	Mucílago de <i>Opuntia spp.</i>	Agua de mar	Conductividad eléctrica	Reducción máxima de 98.09 % (75,000 a 1,435 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
Presente estudio	Mucílago de <i>Opuntia spp.</i>	Salmuera patrón	Conductividad eléctrica	Reducción máxima de 98.43 % (73,000 a 1,147 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
(González Avilez <i>et al.</i> , 2024)	Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	Agua de río	Metales pesados	Remoción máxima de 90.28 % de metales pesados
(Otálora <i>et al.</i> , 2023)	Gel de mucílago de <i>Opuntia</i>	Aguas residuales domésticas	Turbidez y color	Remoción de 94 % de turbidez y de 87 % de color
(Djerroud Mohellebi <i>et al.</i> , 2023)	Mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	Agua residual industrial	DQO	Remoción máxima de 69.77 % de DQO

Por lo tanto, los biopolímeros derivados de plantas podrían constituir una alternativa prometedora para el desarrollo de sistemas sostenibles de tratamiento de agua potencialmente aplicables a la reducción de salinidad. Aunque tecnologías convencionales como la ósmosis inversa continúan siendo las más utilizadas a escala industrial, su elevado consumo energético y los costos operativos asociados han impulsado la búsqueda de métodos alternativos más accesibles y ambientalmente amigables para el tratamiento de agua salina (Montazeri *et al.*, 2024).

Los resultados del presente estudio fueron consistentes con investigaciones previas que han documentado la capacidad de diversos biopolímeros naturales para interactuar con especies iónicas presentes en soluciones acuosas. Diferentes mucílago vegetales y polisacáridos naturales han sido evaluados como coagulantes, floculantes y adsorbentes en procesos de tratamiento de agua, mostrando reducciones significativas de turbidez, materia suspendida y algunas especies iónicas disueltas (Fakhri *et al.*, 2023; Raissouni *et al.*, 2024). En concordancia con dichos antecedentes, los mucílago de origen cactáceo evaluados en este trabajo mostraron reducciones importantes de conductividad eléctrica, particularmente a concentraciones elevadas de biomasa.

Una ventaja potencial de los mucílago vegetales radicó en su disponibilidad, origen renovable, biodegradabilidad y bajo costo de obtención en comparación con adsorbentes sintéticos o tecnologías convencionales de desalinización. No obstante, también presentan limitaciones asociadas a la variabilidad natural de la biomasa, la necesidad de etapas de separación posteriores al tratamiento y la falta de información detallada sobre su selectividad hacia iones específicos.

Por otra parte, tecnologías consolidadas como la ósmosis inversa permiten alcanzar elevados niveles de remoción de sales disueltas y producir agua de alta calidad. No obstante, su implementación requiere infraestructura especializada, membranas de elevado costo y un consumo energético significativo. En este contexto, los mucílago vegetales podrían representar una alternativa complementaria para procesos de pretratamiento o reducción parcial de la salinidad, especialmente en escenarios donde se prioricen la sostenibilidad, la disponibilidad local de materias primas y la reducción de costos operativos.

Otro aspecto relevante para investigaciones futuras será evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de etanol durante la etapa de precipitación del mucílago residual. Aunque este trabajo permitió mejorar significativamente la separación del biopolímero y reducir la conductividad eléctrica final de las muestras tratadas, su implementación a mayor escala requerirá analizar aspectos relacionados con la recuperación y reutilización del disolvente, el consumo energético asociado a su separación, la seguridad operacional y los costos de operación.

También, será necesario evaluar la gestión del residuo sólido constituido por el mucílago y las sales retenidas, considerando alternativas para su valorización, reutilización o disposición final ambientalmente segura. El análisis de estos factores será fundamental para determinar la sostenibilidad integral y la viabilidad práctica del proceso propuesto.

Aunque los resultados obtenidos fueron alentadores y mostraron el potencial de los mucílagos vegetales como materiales bioadsorbentes, serán necesarios estudios adicionales para comparar de manera directa su desempeño frente a otras tecnologías de tratamiento de agua.

Conclusiones

Las evaluaciones realizadas permitieron analizar el comportamiento de diversos mucílagos vegetales provenientes de especies cactáceas (nopal, jague y sábila) y de semillas (moringa y linaza) como materiales biopoliméricos aplicados al tratamiento de soluciones salinas. En general, todas las especies estudiadas mostraron una disminución progresiva de la conductividad eléctrica durante los ciclos de lavado, observándose diferencias asociadas tanto al origen botánico como a la concentración de mucílago empleada.

Los valores de pH registrados durante los tratamientos evidenciaron modificaciones químicas en el sistema, consistentes principalmente en una disminución gradual del pH conforme avanzaron los ciclos de lavado. Estas variaciones sugieren la existencia de interacciones entre los grupos funcionales presentes en los polisacáridos del mucílago y las especies iónicas presentes en la solución, lo que podría estar relacionado con fenómenos de adsorción, intercambio iónico y formación de complejos poliméricos.

Los resultados del presente estudio sugieren que los mucílagos vegetales evaluados fueron capaces de reducir significativamente la conductividad eléctrica bajo las condiciones experimentales empleadas. Sin embargo, debido a que no se realizaron determinaciones específicas de Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} , la información generada no permite establecer de manera concluyente el grado real de remoción de sales individuales ni demostrar una desalinización completa del agua tratada.

Los mecanismos fisicoquímicos discutidos en este trabajo deben considerarse interpretaciones sustentadas en el comportamiento observado de la conductividad eléctrica y del pH, así como en antecedentes reportados en la literatura, ya que no fueron verificados mediante análisis directos de composición iónica.

Por lo tanto, los resultados obtenidos sugieren que los mucílagos vegetales constituyen materiales de interés para el desarrollo de tecnologías sostenibles de tratamiento de agua orientadas a la reducción de conductividad eléctrica y a la disminución estimada de salinidad; además de su disponibilidad, bajo costo, origen renovable y facilidad de obtención. Sin embargo, debido a que el presente estudio se basó en mediciones de conductividad eléctrica como indicador indirecto de salinidad y no incluyó análisis específicos de composición iónica, los resultados deben considerarse preliminares y requerir validación adicional.

Como parte de trabajos futuros, será necesario realizar análisis iónicos detallados, balances de masa y caracterización química del agua tratada para validar los mecanismos potenciales propuestos en este estudio y determinar cuantitativamente la remoción de especies salinas individuales. Asimismo, serán necesarios estudios de calidad microbiológica, estabilidad del agua tratada, recuperación y reutilización de etanol, evaluación económica, consumo energético, escalamiento del proceso y seguridad operativa, con el fin de establecer la viabilidad técnica, ambiental y económica de esta tecnología en aplicaciones prácticas de tratamiento de agua.

Bibliografía

- Abdelhamid, H. N. (2025). Degradable biopolymer-based nanocomposites in water treatment and air purification: A review. *ACS Applied Polymer Materials*, 7(11), 6576–6596. <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c00600>
- Ahmaruzzaman, Md., Roy, P., Bonilla-Petriciolet, A., Badawi, M., Ganachari, S. V., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2023). Polymeric hydrogels-based materials for wastewater treatment. *Chemosphere*, 331, 138743. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138743>
- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>

- Alsaka, L., Alsaka, L., Altaee, A., Zaidi, S. J., Zhou, J., & Kazwini, T. (2025). A review of hydrogel application in wastewater purification. *Separations*, 12(2), 51. <https://doi.org/10.3390/separations12020051>
- Ben Rouane, D., Ait Errouhi, A., & Mghaiouini, R. (2025). Seawater desalination: A review of technologies, environmental impacts, and future perspectives. *Desalination and Water Treatment*, 324, 101578. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101578>
- Chelu, M., Musuc, A. M., Popa, M., & Calderon Moreno, J. M. (2023). Chitosan hydrogels for water purification applications. *Gels*, 9(8), 664. <https://doi.org/10.3390/gels9080664>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Djerroud Mohellebi, N., Adjeroud Abdellatif, N., Azzouz, Z., Elabbas, S., Merzouk, B., Kobya, M., & Madani, K. (2023). Treatment of wastewaters from food aromas and ingredients production by electrocoagulation (EC) treatment aided by mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 25, 192–213. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v25i.518>
- Elsargany, M. (2023). The potential use of *Moringa peregrina* seeds and seed extract as a bio-coagulant for water purification. *Water*, 15(15), 2804. <https://doi.org/10.3390/w15152804>
- Fakhri, V., Jafari, A., Layaei Vahed, F., Su, C.-H., & Pirouzfard, V. (2023). Polysaccharides as eco-friendly bio-adsorbents for wastewater remediation: Current state and future perspective. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103980. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103980>
- González Avilez, E., Rodríguez González, F., Vargas Solano, S. V., Osorio Ruiz, A., Jonathan, M. P., & Campos Villegas, L. E. (2024). Effect of the concentration of uronic acids in *Opuntia* mucilage on the removal of heavy metals and water quality of the Yautepéc River, Mexico. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(3), 105636. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105636>
- Haseeb, M. T., Muhammad, G., Hussain, M. A., Bukhari, S. N. A., & Sheikh, F. A. (2024). Flaxseed (*Linum usitatissimum*) mucilage: A versatile stimuli-responsive functional biomaterial for pharmaceuticals and healthcare. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278, 134817. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134817>
- Javed, S., Zulfiqar, Z., Fatima, Z., Muhammad, G., Hussain, M. A., Mushtaq, M., & Haseeb, M. T. (2024). A comprehensive review of plant-based mucilages as promising candidates for water remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 114035. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114035>
- Kasbaji, M., Mennani, M., Oubenali, M., Ait Benhamou, A., Boussetta, A., Ablouh, E.-H., Mbarki, M., Grimi, N., El Achaby, M., & Moubarik, A. (2023). Bio-based functionalized adsorptive polymers for sustainable water decontamination: A systematic review of challenges and real-world implementation. *Environmental Pollution*, 335, 122349. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122349>
- Konkobo, F. A., Diao, M., Savadogo, P. W., Dakuyo, R., Roamba, N. E., Zongo, S., & Dicko, M. H. (2024). Reduction of malnutrition related to unsafe water consumption in developing countries: Potabilization of surface water and traditional well water, with plant extracts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(5), 519. <https://doi.org/10.3390/ijerph21050519>
- León Martínez, F. M., & Cano Barrita, P. F. de J. (2024). Cactus mucilage: A review of its rheological and physicochemical properties and use as bio-admixture in building materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135111. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135111>
- Montazeri, S. M., Kalogerakis, N., & Kolliopoulos, G. (2024). CO₂ nanobubbles as a novel kinetic promoter in hydrate-based desalination. *Desalination*, 574, 117296. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117296>
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water Research*, 35(2), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6)
- Otálora, M., Wilches Torres, A., Lara, C. R., Díaz Gómez, J., Gómez Castaño, J. A., & Cifuentes, G. R. (2023). Assessment of prickly pear fruit peel mucilage in form of gel as a green coagulant for the tertiary treatment of domestic wastewater. *Gels*, 9(9), 723. <https://doi.org/10.3390/gels9090723>
- Otálora, M., Wilches Torres, A., Lara, C., Cifuentes, G., & Gómez Castaño, J. (2022). Use of *Opuntia ficus-indica* fruit peel as a novel source of mucilage with coagulant physicochemical/molecular characteristics. *Polymers*, 14(18), 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>
- Panagopoulos, A. (2025). Assessing the energy footprint of desalination technologies and minimal/zero liquid discharge (MLD/ZLD) systems for sustainable water protection via renewable energy integration. *Energies*, 18(4), 962. <https://doi.org/10.3390/en18040962>
- Raissouni, B., Benkara, L. M., & Lapointe, M. (2024). Fiber-based super-bridging agents improve flotation and settling during water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 63, 105499. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105499>
- Rasheed, F. A., Alkaradaghi, K., & Al-Ansari, N. (2023). The potential of *Moringa oleifera* seed in water coagulation-flocculation technique to reduce water turbidity. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(4), 250. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06238-3>
- Rinaudo, M. (2008). Main properties and current applications of some polysaccharides as biomaterials. *Polymer International*, 57(3), 397–430. <https://doi.org/10.1002/pi.2378>
- Sirota, R., Winters, G., Levy, O., Marques, J., Paytan, A., Silverman, J., Sisma-Ventura, G., Rahav, E., Antler, G., & Bar-Zeev, E. (2024). Impacts of desalination brine discharge on benthic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 58(13), 5631–5645. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c07748>
- Xu, Y., Wang, C., Ling, Q., & Sang, L. (2025). Advances in pervaporation desalination based on polymer membranes. *RSC Advances*, 15(26), 20985–21005. <https://doi.org/10.1039/D5RA00895F>
- Zhang, G., & Wang, X. (2024). Seawater desalination system driven by sustainable energy: A comprehensive review. *Energies*, 17(22), 5706. <https://doi.org/10.3390/en17225706>
- Zhang, J., Li, P., Yu, Y., Xu, Y., Jia, W., & Zhao, S. (2023a). A review of natural polysaccharides-based flocculants derived from waste: Application efficiency, function mechanism, and development prospects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(39), 15774–15789. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02563>
- Zhang, W., Xu, Y., Mu, X., Li, S., Liu, X., & Lei, Z. (2023b). Research progress of polysaccharide-based natural polymer hydrogels in water purification. *Gels*, 9(3), 249. <https://doi.org/10.3390/gels9030249>
- Zheng, D., Wang, K., & Bai, B. (2024). A critical review of sodium alginate-based composites in water treatment. *Carbohydrate Polymers*, 331, 121850. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121850>
- Zimmerman, B. K., Schulman, R., & Nguyen, T. D. (2025). Growth-induced Donnan exclusion influences swelling kinetics in highly charged dynamic polymerization hydrogels. *Extreme Mechanics Letters*, 78, 102354. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2025.102354>