

Aprovechamiento de residuos generados a partir del fruto de higo chumbo (*Opuntia* *indica*) como posible coagulante para el tratamiento de aguas

Mauricio Esteban González Duarte

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Tunja
2023**

Aprovechamiento de residuos generados a partir del fruto de higo chumbo (*Opuntia ficus – indica*) como posible coagulante para el tratamiento de aguas

Mauricio Esteban González Duarte

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

Director (a):

María Carolina Otálora

Mg. Ciencia y Tecnología de Alimentos

Codirector (a):

Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio

Mg. Ciencias Ambientales

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Tunja

2023

Nota de aceptación:

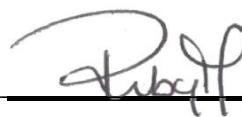
El estudiante Mauricio Esteban Gonzalez Duarte, realizo la alternativa de grado en la modalidad de trabajo de grado, con el proyecto titulado: “Aprovechamiento de de residuos generados a partir del fruto higo chumbo (Opuntia ficus-indica) como posible coagulante para el tratamiento de aguas”, obteniendo una nota de aprobación de cuatro punto cinco (4.5).



Firma del Presidente del Jurado



Firma del Jurado



Firma del Jurado

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

A Dios por haberme brindado la oportunidad de cumplir esta gran meta, pues pese a varios obstáculos siempre estuvo presente dándome las ganas y fortaleza de avanzar.

A mis queridos padres Mauricio y Emilsen por brindarme la educación y principios que me han permitido avanzar en mi vida académica y futura profesional y a mi hermano Camilo por ser parte de la causa que me impulso en todo este proceso.

Finalmente agradezco a mi pareja, por su apoyo incondicional y su voz de aliento en cada momento difícil de todo este proceso.

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

La Universidad de Boyacá y en especial a la doctora María Carolina Otálora y al doctor Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio quienes fueron los encargados de dirigir, apoyar y brindar los conocimientos necesarios para el desarrollo de este proyecto. Y a todas las personas que de una u otra manera hayan sido participes de la realización de este proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
Obtención un biopolímero, mucílago, a partir de la cáscara generada por el consumo de frutos higo chumbo.....	18
Uso de coagulantes naturales	18
Extracción del mucílago	19
Caracterización estructural, morfológica y térmicamente el mucílago extraído de la cáscara del higo chumbo para su posible uso como coagulante natural.....	21
Caracterización estructural.....	21
Caracterización morfológica.....	25
Caracterización térmica	26
Conclusiones	28
Recomendaciones	29
Referencias.....	30
Anexos	34

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Frutos de Higo chumbo utilizado como materia prima para extraer el mucílago	19
Figura 2. Descripción del proceso de extracción del mucílago a partir de las cáscaras de higo chumbo.....	20
Figura 3. Espectro de masas del componente polisacárido principal del mucílago extraído de cáscaras de higo chumbo	22
Figura 4. Espectros FTIR (a) y Raman (b) de mucílago en polvo extraído de cáscaras de frutos higo chumbo	24
Figura 5. Imágenes de micrografía SEM de la superficie a 500× (superior) y 5000× (inferior) de mucílago en polvo extraído de la cáscara del fruto Higo chumbo	26
Figura 6. Termogramas TGA/DSC de mucílago en polvo de cáscara de fruta Opuntia ficus-indica	27

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto	35

Glosario

Bio-coagulante: compuestos por polímeros de origen natural extraídos de plantas, algas o animales, enfocado a tratar las aguas residuales (Okoro et al., 2021).

Cáscara: capa protectora de una fruta o vegetal, del cual puede desprenderse (Montes et al, 2013).

Coagulante: son sales metálicas que reaccionan con la alcalinidad del agua, para producir un flóculo de hidróxido del metal, insoluble en agua, que incorpore a las partículas coloidales. (Okoro et al., 2021).

DSC/TGA: análisis Termogravimétrico (TGA) y la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), son técnicas con las cuales se determina el cambio de las propiedades físicas de los compuestos químicos y materiales en función de la temperatura o el tiempo (Vargas-Solano et al, 2022).

Espectroscopia FTIR: la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier es una técnica utilizada para obtener un espectro infrarrojo de absorción o emisión de un sólido, líquido o gas. Un espectrómetro FTIR recopila simultáneamente datos espectrales de alta resolución en un amplio rango espectral (Vargas-Solano et al., 2022).

Higo chumbo: el higo chumbo es el fruto de la chumbera (*Opuntia ficus-indica*), también conocida como palera, higuera de pala, higuera de indias, figuera de moro, tuna o nopal. Se trata de una planta arbustiva suculenta de la familia de las Cactáceas o cactus, ramificada y con porte y tamaño muy variable, que es capaz de alcanzar grandes dimensiones en su estado silvestre, superando incluso los cuatro metros de altura (Vargas-Solano et al., 2022).

Inorgánico: que no es ni ha sido parte de un ser vivo, ni está formado por restos de seres vivos (Gheribi et al., 2018).

Microscopia Electrónica de Barrido (SEM): el microscopio electrónico de barrido es un tipo de microscopio electrónico capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Aplica un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen (Clavijo, 2013).

Mucílago: el mucílago es una sustancia vegetal viscosa, coagulable al alcohol. También es una solución acuosa espesa de una goma o dextrina utilizada para suspender sustancias insolubles y para aumentar la viscosidad (Sáenz et al., 2004).

Potencial Z: se define como el potencial en el plano de cizalla en la doble capa eléctrica. Se utiliza frecuentemente en discusiones de estabilidad de coloides y su valor es considerado útil en relación con la doble capa eléctrica. La doble capa es dividida en una parte compacta adyacente a la superficie y una parte difusa. (Betancurt et al., 2012).

Residuo: la palabra residuo (con origen en el latín residuum) describe al material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para realizar un determinado trabajo. Por lo tanto, el concepto de residuo se emplea como sinónimo de basura, es decir, por hacer referencia a los desechos que el hombre ha producido (Definicion.de, s.f.).

Resumen

Aprovechamiento de residuos generados a partir del fruto de higo chumbo (*Opuntia ficus – indica*) como posible coagulante para el tratamiento de aguas:

En este trabajo se realizó un aprovechamiento de los residuos que genera el consumo del fruto higo chumbo (*Opuntia ficus – indica*) como un posible coagulante para el tratamiento de aguas. En este contexto, se obtuvo un biopolímero en polvo, mucílago a partir de las cascacas de higo chumbo (*Opuntia ficus – indica*), mediante un proceso de hidratación, extrusión y precipitación alcohólica, el cual fue caracterizado estructural (mediante espectroscopía FTIR and potencial Z), morfológica (a partir de análisis SEM) y térmicamente (por DSC/TGA) en miras de valorizarse su producto como coagulante natural en el tratamiento de aguas.

La valorización de este subproducto, como coagulante natural, estuvo enmarcada en la estructura química, carga eléctrica y morfológica, es decir, la presencia de grupos funcionales cargados de forma aniónica con morfológica heterogénea, que permitió determinar que el mecanismo predominante en un proceso de coagulación al ser incorporado en el tratamiento sería por adsorción y/o puenteo.

El peso molecular promedio del biopolímero es relativamente bajo para un polímero y contribuye a una mejor solubilidad en agua que facilita el uso de este mucílago como un potencial coagulante. La caracterización estructural permitió determinar que el mucílago obtenido de las cáscaras del higo chumbo es un polisacárido rico en ácido galacturónico, de morfológica agrietada, porosa y rugosa, de condición iónica, propiedades idóneas para actuar como coagulante natural, que brindan valor agregado a estos bio-productos agrícolas.

Se logró valorizar la cáscara del fruto higo chumbo que, al ser considerado un residuo, un desecho este puede ser utilizado como materia prima para la elaboración de un posible biocoagulante para el tratamiento de agua/ aguas residuales aportando de esta manera a la solución del manejo integral de los residuos.

Debido a las características estructurales, morfológicas y térmicas del mucílago se recomienda hacer pruebas en aguas residuales para evidenciar su eficiencia en la remoción de turbiedad y color, y así poder categorizarlo como un coagulante natural novedoso y sostenible.

Palabras claves: higo chumbo, mucílago, coagulante, residuo, aprovechamiento

Abstract

Use of waste generated from the prickly pear fruit (*Opuntia ficus - indica*) as a possible coagulant for water treatment:

In this work, the waste generated by the consumption of the prickly pear fruit (*Opuntia ficus – indica*) was used as a possible coagulant for water treatment. In this context, a biopolymer powder, mucilage, was obtained from the peels of prickly pear (*Opuntia ficus – indica*), through a process of hydration, extrusion and alcoholic precipitation, which was structurally characterized (by FTIR spectroscopy and Z potential.), morphological (from SEM analysis) and thermally (by DSC/TGA) in order to valorize this by-product as a natural coagulant in water treatment.

The valorization of this byproduct, as a natural coagulant, was framed in the chemical structure, electrical charge and morphology, that is, the presence of anionically charged functional groups with heterogeneous morphology, which allowed us to determine that the predominant mechanism in a coagulation process When incorporated into the treatment it would be by adsorption and/or bridging.

The average molecular weight of the biopolymer is relatively low for a polymer and contributes to better water solubility that facilitates the use of this mucilage as a potential coagulant. The structural characterization allowed us to determine that the mucilage obtained from the peels of the prickly pear is a polysaccharide rich in galacturonic acid, with a cracked, porous and rough morphology, of ionic condition, ideal properties to act as a natural coagulant, which provide added value to these organic -Farm products.

It was possible to valorize the peel of the prickly pear fruit, which, being considered a waste, can be used as raw material for the production of a possible biocoagulant for the treatment of water/wastewater, thus contributing to the management solution. comprehensive waste.

Due to the structural, morphological and thermal characteristics of mucilage, it is recommended to test it in wastewater to demonstrate its efficiency in removing turbidity and color, and thus be able to categorize it as a novel and sustainable natural coagulant.

Keywords: prickly pear, mucilage, coagulant, residue, use

Introducción

En Colombia el consumo y procesamiento de frutos de *Opuntia ficus-indica*, planta cactácea que se encuentra de manera silvestre en zonas áridas de los departamentos de Santander, Nariño y la Guajira, produce la acumulación de grandes cantidades de la cáscara, subproducto que comúnmente se desecha o se utiliza como alimento para el ganado generando un posible riesgo al medio ambiente, ya que solo el 10 % es consumido por los animales y el resto se pudre generando malos olores, proliferación de insectos que afectan la salud pública y productos de descomposición, lo que conlleva a problemas socioeconómicos por su alta disposición y costo (Choy et al., 2014). Para dar sostenibilidad a la producción de un producto primario tan importante para el país, es necesario valorizar estos residuos mediante la obtención de productos de alto potencial para ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales. La cáscara de fruto de *Opuntia ficus-indica* tiene un compuesto llamado mucílago que es un heteropolisacárido de naturaleza poli electrolítica aniónica, este biopolímero ha ganado un creciente interés ambiental debido a sus características coagulantes (Gheribi et al., 2019).

Valorizar la cáscara del fruto de *Opuntia ficus-indica*, con la obtención del mucílago, un coagulante natural a base de polisacáridos, para ser usado en el tratamiento de aguas y aguas residuales, es una alternativa promisoría. La funcionalidad del mucílago, como coagulante natural, de naturaleza biodegradable, seguros y no tóxicos, está enmarcada en la estructura química, carga eléctrica y morfología, es decir, la presencia de grupos funcionales cargados de forma aniónica o catiónica y la estructura homo o hetera, que permitirá conocer que mecanismo, sea por adsorción y/o puenteo, predominará en un proceso de coagulación al ser incorporado en el tratamiento de aguas. (Koul et al., 2022); (Amaya-Cruz et al., 2019); (Melgar et al., 2017).

Con la caracterización del mucílago, como coagulante natural, se busca sustituir los tradicionales coagulantes inorgánicos, tales como sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), cloruro férrico (FeCl_3), sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), cloruro de aluminio (AlCl_3) y cloruro de titanio (TiCl_3), que contienen efectos negativos para el medio ambiente y la salud humana, generando lodos que son difíciles de deshidratar los cuales tienen elevados niveles de toxicidad, y generando enfermedades como Alzheimer.

El mucílago extraído de cladodios de *Opuntia Ficus-Indica* (OFI) ha sido ampliamente evaluado en procesos de coagulación/floculación. (Pichler et al., 2012) demostraron que el extracto

gelificante de OFI es mejor floculante que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, y que puede ser utilizado en el tratamiento de aguas. Vargas-Solano et al, (2022) estudiaron la capacidad del mucílago de *Opuntia ficus - indica* (OFI) como material coagulante para la remoción de metales pesados (HM) presentes en muestras de agua del río Yautepec, Morelos México donde los resultados donde mostraron que el OFI tuvo una reducción de la turbidez del agua mayor al 70% y una capacidad de remoción mayor al 90% para hierro (Fe) y manganeso (Mn), y mayor al 60% para cromo (Cr) y arsénico (As), y menos del 40% para cadmio (Cd), níquel (Ni) y plomo (Pb). A. pesar de su efectividad, el escalado industrial del mucílago extraído de los cladodios OFI como coagulante natural es poco factible debido a la falta de sustentabilidad del proceso productivo de toda la planta.

Con la valorización de la cáscara del fruto higo chumbo como coagulante natural se busca reemplazar a los tradicionales coagulantes inorgánicos, lo que implica la aceptación en el sector industrial (compatibilidad con homólogos – disponibilidad – estabilidad – rentabilidad y eficiencia) y la mejora de la salud pública. Esta aceptación puede ser limitada debido a la falta de uso real o a escala piloto del coagulante, así como la falta de aprobación y lineamientos regulatorios en el tratamiento del agua potable, sin embargo, este coagulante natural sería beneficioso para las áreas rurales, ya que facilitarían la salud e higiene lo que mejoraría el nivel de vida de los usuarios.

En este escenario, el objetivo de esta investigación fue caracterizar estructural (FTIR y potencial zeta), morfológica (SEM) y térmica (DSC/TGA) el mucílago obtenido de las cáscaras del fruto de Higo chumbo, que permitieron plantear su uso como coagulante natural para el tratamiento de aguas.

Obtención un biopolímero, mucílago, a partir de la cáscara generada por el consumo de frutos higo chumbo

Uso de coagulantes naturales

Debido a que los coagulantes inorgánicos normalmente utilizados en el tratamiento de aguas generan efectos negativos como grandes costos, toxicidad para los humanos y el medio ambiente, naturaleza corrosiva y cancerígena, alteración del pH del agua tratada, producción de lodos peligrosos y no biodegradables, altos costos de eliminación y demás, a surgido la necesidad de explorar otras medidas posibles para reducir los efectos nocivos de estos en el ecosistema. Por lo tanto, ha habido un cambio en el tratamiento que se le debe dar al agua, que alentó a las industrias a mejorar la cultura de los operadores de agua en la adopción e implementación del desarrollo sostenible en sus actividades. Entre las prácticas funcionales se encuentra la sustitución de coagulantes químicos por sus homólogos naturales en los procesos de tratamiento de aguas, lo que ha llevado a la disminución de los efectos ambientales en términos de producción, consumo y manejo de residuos secundarios. Estos homólogos naturales son polielectrolitos (aniónicos, catiónicos o neutros), seguros y económicos, con una gran capacidad para mantener el pH del agua a tratar, los cuales no aumentan la carga de metales durante el tratamiento y se caracterizan por generar un bajo volumen de lodos, por lo que el costo de disposición es muy bajo, siendo una alternativa sostenible a los químicos (Koul et al, 2022).

En este contexto, las semillas de Moringa Oleífera y Nirmali, así como el mucílago extraído de los cladodios *Opuntia Ficus-Indica* han sido los más empleados como coagulantes naturales para el tratamiento de agua bruta y residual (Pardo et al., 2020).

El mucílago, un heteropolisacárido coloidal de naturaleza aniónica, ha sido utilizado como un coagulante potencial para el tratamiento del agua, debido a la presencia de la molécula del ácido galacturónico, que permite la adsorción y el puenteo de las partículas coloidales, facilitando la eliminación de turbidez y color.

Extracción del mucílago

Para llevar a cabo la extracción del mucílago se realizó una recolección de cáscaras de fruta frescades higo chumbo de restaurantes, cafeterías y demás locales, las cuales fueron mantenidas a 4°C hasta su uso.

Figura 1

Frutos de Higo chumbo utilizado como materia prima para extraer el mucílago



Fuente: Autor

El proceso de extracción de mucílago se llevó de acuerdo al procedimiento descrito por Otálora et al. (2022). En la Figura 2 se muestra algunas fotografías que muestran dicho proceso.

Figura 2

Descripción del proceso de extracción del mucílago a partir de las cáscaras de higo chumbo



Fuente: Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Cifuentes, G. R., Gómez Castaño, J. A, (2022). Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus- indica* como fuente novedosa de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes. *Polímeros*, 14, 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>

Las cáscaras de Higo chumbo se trozaron y depositaron en vasos de precipitados de 100 mL al que se le añadió agua destilada a temperatura ambiente en una relación 1:2 p/v (cáscara: agua)dejándolo en reposo por 12 horas a temperatura ambiente. Las cáscaras hidratadas se exprimieron manualmente hasta obtener un gel. Este gel se le añadió etanol al 95% a 18 °C en una proporción de 3:1 (etanol: gel), y se dejó en reposo la mezcla durante 15 min sin agitación hasta la formación de un sobrenadante de color blanco lechoso al que se denominó mucílago. Este mucílago se secó en estufa a 50 °C por 3 horas. El material seco se macero manualmente en un mortero de porcelana y posteriormente se tamizo a través de una malla #60 hasta obtener un polvo fino (granulometría estándar $\leq 250 \mu\text{m}$). El mucílago en polvo se colocó en bolsas de polietileno de alta densidad y se almaceno en un desecador, a temperatura ambiente con una humedad relativa del 30%, hasta su caracterización.

Caracterización estructural, morfológica y térmicamente el mucílago extraído de la cáscara del higo chumbo para su posible uso como coagulante natural

El mucílago previamente obtenido fue estructural (UPLC-QTOF, FTIR, Raman y potencial zeta), morfológica (SEM) y térmicamente (DSC/TGA) caracterizado de acuerdo a la metodología descrita por Otálora et al (2022).

Caracterización estructural

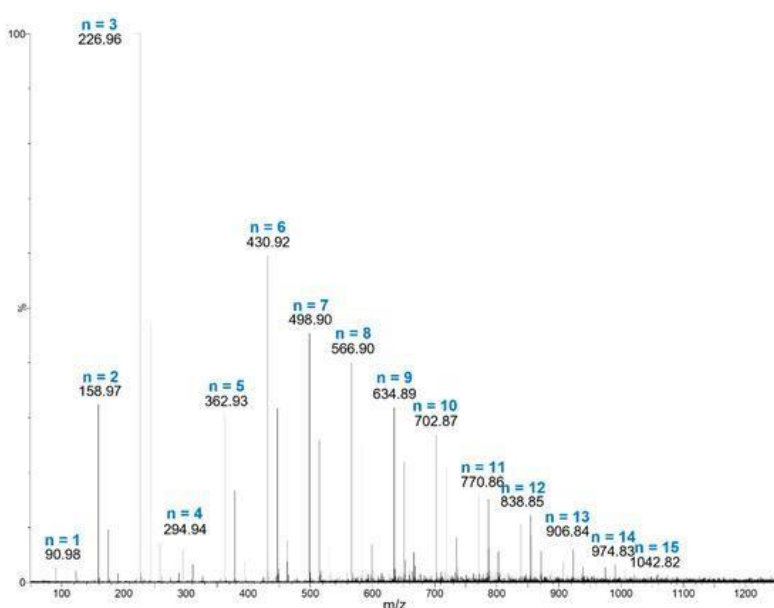
Peso molecular: este análisis UPLC-QTOF se realizó en modo de ionización por electropulverización positiva (ESI). Una muestra de mucílago en polvo se diluyó en agua desionizada a una concentración de 1 mg/mL y se agitó durante 6 h a temperatura ambiente. A continuación, la solución se centrifugó a 5000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se filtró a través de un filtro Millipore de 0,45 micras. Alícuotas (5 μ L) se separaron a través de una columna analítica Acquity UPLC BEH C18 (2,1 mm \times 100 mm, 1,7 μ m tamaño de partícula). El sistema eluyente estaba compuesto por agua tipo I y ácido fórmico al 0,1% (disolvente A) y acetonitrilo y Polímeros 2022, 14, 3832 4 de 13 Ácido fórmico al 0,1 % (disolvente B) a un caudal de 0,4 ml/min. El programa de elución en gradiente se estableció de la siguiente manera: 0–5 min (95 % A), 6–18 min (50 % A) y 19–20 min (95 % A). Se mantuvieron los siguientes parámetros: temperatura de la fuente 120°C, temperatura de desolvatación 350°C, caudal de gas de desolvatación a 800 L/h, y caudal de gas de cono de 100 L/h. Los voltajes de cono y capilar se fijaron en 20 V y 2,5 kV, respectivamente.

La Figura 3 muestra los valores de peso molecular promedio (M_n , M_w , M_z y M_{z+1}) y el índice de polidispersidad (M_w/M_n) del polisacárido. En total, quince iones moleculares de cadena polimérica $[M + H]^+$, de $N = 1$ a 15, conforman este sistema de azúcar biopolimérico ramificado, a partir del cual se calculó un peso molecular promedio estadístico de 438.80 Da. Este peso molecular promedio relativamente bajo para un polímero contribuye a una mejor solubilidad en agua que facilita el uso de este mucílago como un potencial coagulante; esto contrasta con otros compuestos biopoliméricos relacionados, como el quitosano, que tienen pesos moleculares mucho más altos (50–2000 kDa). La mayor contribución ponderada al peso molecular promedio en el polímero de mucílago de cáscaras de higo chumbo proviene de cadenas de longitud $N = 3$, lo que

indica que este fragmento es la ramificación/terminación más abundante en este biopolímero. $N = 1$ da un m/z de 91 Da $[M + H]^+$, lo que condujo a la identificación del componente monosacárido como $C_3H_6O_3$, correspondiente a una triosa (gliceraldehído). Mientras tanto, la pérdida de una masa recurrente de 68 Dalton entre las cadenas de polímero es consistente con el subóxido de carbono (C_3O_2). (Otálora et al., 2022).

Figura 3

Espectro de masas del componente polisacárido principal del mucílago extraído de cáscaras de higo chumbo



Fuente: Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Cifuentes, G. R., Gómez Castaño, J. A., (2022). Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus-indica* como fuente novedosa de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes. *Polímeros*, 14, 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>

Potencial Z: el potencial zeta de la muestra de mucílago se midió utilizando un analizador de potencial zeta de tamaño de partícula NanoPlus, NanoPlusTM 3” (Norcross, GA, EE. UU.) a 25°C y pH 5,68. El mucílago en polvo (608 mg) se dispersó en 100 mL de agua destilada utilizando un agitador magnético (C-MAG HS 7 S000, IKA, Staufen im Breisgau, Alemania) a 8000 rpm durante 6 h a 18°C y pH = 7.

Por otro lado, el potencial zeta del mucílago presentó una carga de -23.63 ± 0.55 mV, por lo que la muestra se clasifica como un biopolímero polielectrolítico aniónico (Bouaouine et al.,

2019), reporto un valor de potencial zeta similar (-23 mV) para el mucílago extraído de los cladodios *Opuntia ficus-indica*. La naturaleza aniónica del mucílago (-CO y -COOH) sugiere que el comportamiento de coagulación del polisacárido ocurre a través de un mecanismo de puente de adsorción, resultado de la interacción dipolar del mucílago con los cationes divalentes.

Espectroscopia FTIR y RAMAN: los espectros infrarrojos del mucílago en polvo se realizaron en un espectrofotómetro Shimadzu Prestige 21 (Duisburg, Alemania) equipado con un interferómetro tipo Michelson, un divisor de haz KBr/Ge, una lámpara de cerámica y un detector DLATGS, se midieron en el rango de 4500–4520 cm^{-1} con una resolución de 3,0 cm^{-1} y 30 escaneos acumulativos, utilizando la técnica de reflectancia/reflexión total atenuada.

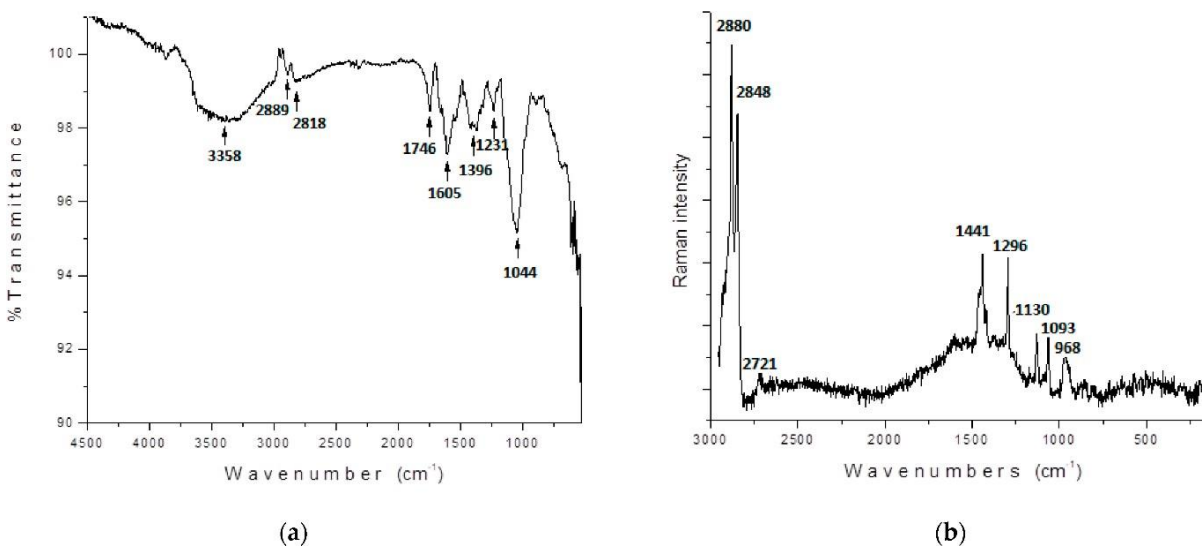
La composición química del mucílago en polvo se analizó utilizando un espectrofotómetro Raman (DXR™ Smart Raman, Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.) equipado con un láser de diodo de excitación de 785 nm. Los espectros se midieron con un tiempo de exploración promedio de 1,0 s utilizando una potencia de láser de 20,0 mW. Se realizaron un total de 20 escaneos por espectro para mejorar la relación señal-ruido

El espectro FTIR del mucílago en polvo (Figura 4a) mostró una banda ancha centrada en 3358 cm^{-1} que se atribuyó al estiramiento de los grupos hidroxilo (O-H) que se adhirieron tanto a la estructura del polisacárido como a los terminales carboxílicos de ácido galacturónico. El amplio perfil de esta absorción refleja una distribución vibratoria extendida causada por muchas interacciones de tipo enlace de hidrógeno (HB).

Las absorciones observadas alrededor de 2889 y 2818 cm^{-1} se asignaron a las vibraciones CH asimétricas y simétricas de estiramiento, respectivamente. Las absorciones observadas en 1746 y 1605 cm^{-1} fueron asignados a la vibración de estiramiento de los grupos funcionales carbonilo (C=O) y carboxílico (-COOH), respectivamente. La banda observada a 1396 cm^{-1} indica la presencia de CO en los grupos carboxílicos que se encuentran principalmente en el ácido galacturónico. Las señales a 1231 y 1044 cm^{-1} son características de los polisacáridos que indican la presencia de diferentes grupos funcionales, como la flexión de COH y COC, respectivamente.

Figura 4

Espectros FTIR (a) y Raman (b) de mucílago en polvo extraído de cáscaras de frutos de higo chumbo



Fuente: Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Cifuentes, G. R., Gómez Castaño, J. A., (2022). Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus-indica* como fuente novedosa de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes. *Polímeros*, 14, 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>

El espectro FTIR muestra la presencia de grupos funcionales orgánicos que dan lugar a la actividad coagulante del mucílago, la presencia de los grupos funcionales hidroxilo y carboxilo (que refleja la naturaleza poli electrolítica del mucílago) en la estructura del ácido galacturónico responsables del proceso de coagulación, proporcionando un puente para que las partículas se adsorban.

El espectro Raman del mucílago en polvo (Figura 5b) mostró una región entre 2880 y 2848 cm⁻¹

¹ que se atribuyó al estiramiento de vibraciones CH asimétricas y simétricas, que se correlacionan con anillos de pentosa en la estructura del polisacárido. La señal observada alrededor de 1441 cm⁻¹ se asignó a las deformaciones simétricas de CH₃ en los grupos acetilo. La señal a 1090 cm⁻¹ indica el alargamiento vibratorio O-H. La absorción observada a 968 cm⁻¹ sugiere la presencia de un enlace glucosídico β.

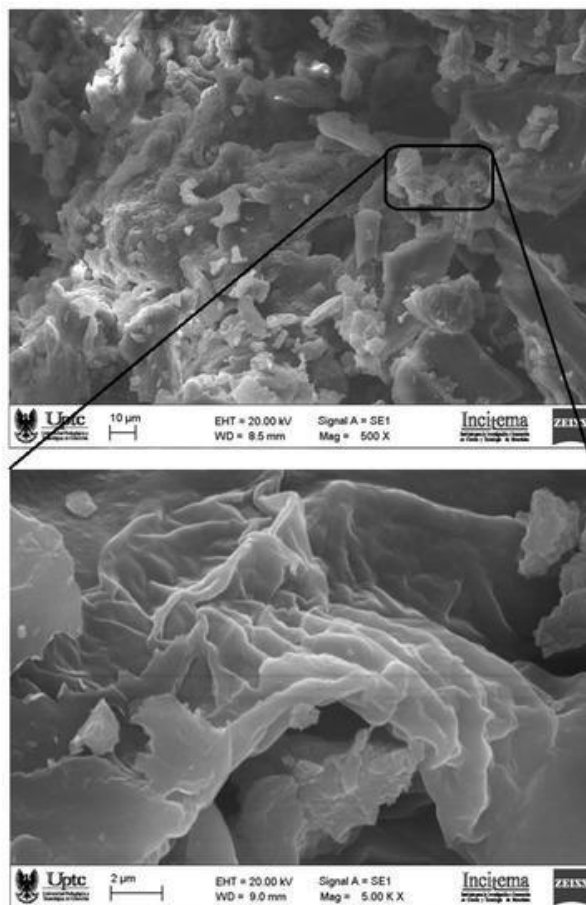
Caracterización morfológica

Microscopia electrónica de barrido (SEM): la morfología microscópica del mucílago en polvo se evaluó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo EVO MA 10-Carl Zeiss (Oberkochen, Alemania) que opera a 20 kV. Todas las muestras fueron recubiertas por pulverización catódica de oro-paladio antes de su examen.

Como se muestra en la Figura 5, la estructura superficial del mucílago, capturada con un aumento de 500x (Figura 5 superior), muestra una textura rugosa, agrietada y porosa, junto con la presencia de cavidades (sitios de adsorción) de forma y tamaño irregulares. Esta morfología es acorde con la química de adsorción, es decir, con sistemas moleculares que facilitan la adsorción de partículas/moléculas/iones de diferentes tamaños (p. ej., contaminantes de aguas residuales). Las imágenes del mucílago que se tomaron con un aumento de 5000X (Figura 5 inferior) mostraron pequeñas partículas que posiblemente correspondían a agregados proteicos adheridos a los carbohidratos presentes en la muestra, a morfología del mucílago obtenido de las cáscaras del fruto de Higo chumbo presenta una microestructura adecuada para un mecanismo de adsorción en el proceso de coagulación.

Figura 5

Imágenes de micrografía SEM de la superficie a 500× (superior) y 5000× (inferior) de mucílago en polvo extraído de la cáscara del fruto Higo chumbo



Fuente: Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Cifuentes, G. R., Gómez Castaño, J. A., (2022). Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus- indica* como fuente novedosa de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes. *Polímeros*, 14, 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>

Caracterización térmica

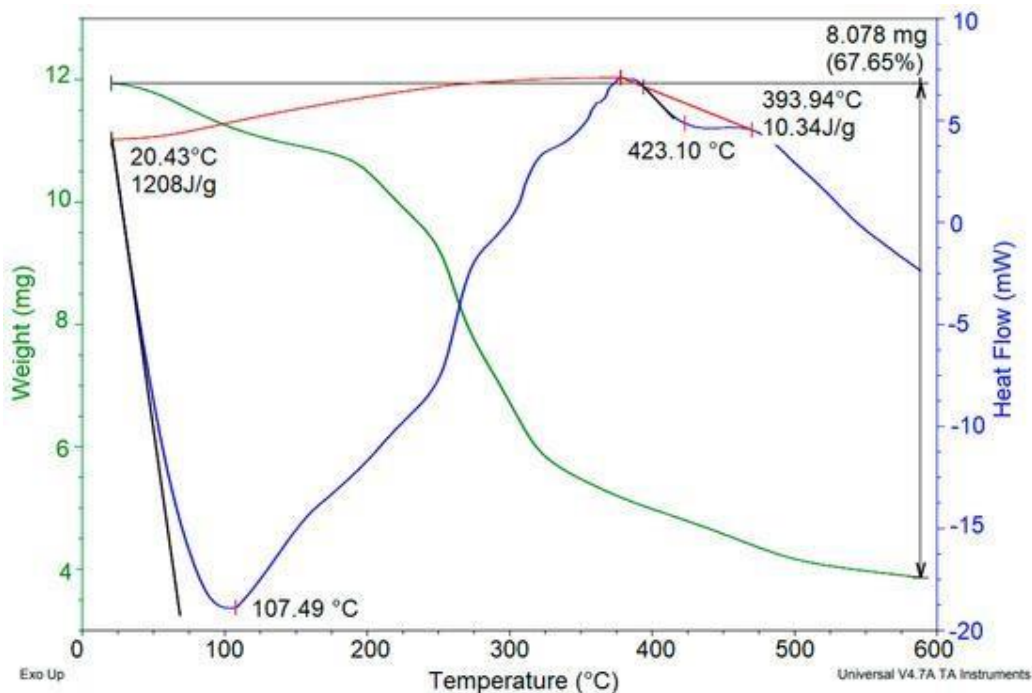
DSC/TGA (calorimetría diferencial de barrido y análisis termogravimétrico): el análisis termogravimétrico (TGA)/calorimetría diferencial de barrido (DSC) de mucílago en polvo se realizó en un instrumento TA (SDT Q600 V20.9 Build 20, New Castle, DE, EE.UU.). Se usó argón como gas de purga (100 ml/min). Las muestras secas de mucílago en polvo se colocaron en cubetas de aluminio y se calentaron de 20 a 600°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

Como se muestra en la Figura 6 el termograma del mucílago revelo dos eventos endotérmicos principales. El primero ocurrió entre 25 y 250 °C (pico 107,49 °C), con una pérdida de masa relacionada de 12,31%. Este evento se atribuyó a la pérdida de agua adsorbida y estructural dentro del polisacárido, seguida de la gelatinización. El segundo evento ocurrió entre 250 y 475.

°C (pico 423,10 °C), con una pérdida de masa del 67,65%. Este evento se puede atribuir a la degradación de la estructura del polisacárido y la posterior descomposición/volatilización del material. Los ácidos urónicos también se descomponen entre 400 y 500 °C. De acuerdo con lo anterior, el contenido de ácido galacturónico del mucílago, debido al rango de temperatura de descomposición, contribuye al proceso de coagulación a través de la formación de puentes de hidrógeno para la adsorción de coloides.

Figura 6

Termogramas TGA/DSC de mucílago en polvo de cáscara de fruta *Opuntia ficus- indica*.



Fuente: Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Cifuentes, G. R., Gómez Castaño, J. A., (2022). Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus- indica* como fuente novedosa de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes. *Polímeros*, 14, 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>

Conclusiones

La caracterización estructural permitió determinar que el mucílago obtenido de las cáscaras del higo chumbo es un polisacárido rico en ácido galacturónico, de morfología agrietada, porosa y rugosa, de condición iónica, propiedades idóneas para actuar como coagulante natural, que brindan valor agregado a estos bio-productos agrícolas.

Se logró valorizar la cáscara del fruto higo chumbo que, al ser considerado un residuo, un desecho este puede ser utilizado como materia prima para la elaboración de un posible biocoagulante para el tratamiento de agua/ aguas residuales aportando de esta manera a la solución del manejo integral de los residuos.

Recomendaciones

Debido a las características estructurales, morfológicas y térmicas del mucílago se recomienda hacer pruebas en aguas residuales para evidenciar su eficiencia en la remoción de turbiedad y color, y así poder categorizarlo como un coagulante natural novedoso y sostenible.

Referencias

- Afolabi, F. O., Musonge, P., y Bakare, B. F. (2021). Evaluation of lead (II) removal from wastewater using banana peels: optimization study. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(2), 1487–1496. <https://doi.org/10.15244/PJOES/122449>
- Ahmad, A., Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Othman, A. R., y Hasan, H. A. (2022). Exploring the extraction methods for plant-based coagulants and their future approaches. *Science of The Total Environment*, 818, 151668. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151668>
- Amaya-Cruz, D. M., Pérez-Ramírez, I. F., Delgado-García, J., Mondragón-Jacobo, C., Dector-Espinoza, A., y Reynoso-Camacho, R. (2019). An integral profile of bioactive compounds and functional properties of prickly pear (*Opuntia ficus indica* L.) peel with different tonalities. *Food Chemistry*, 278, 568–578. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.11.031>
- Andreu-Coll, L., Cano-Lamadrid, M., Sendra, E., Carbonell-Barrachina, Á., Legua, P., y Hernández, F. (2019). Fatty acid profile of fruits (pulp and peel) and cladodes (young and old) of prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] from six Spanish cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 84. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2019.103294>
- Betancurt Corredor, B., Jiménez García, D. M., y Gonzaga Linares, B. G. (2012). Potencial ZETA (ζ) como criterio de optimización de dosificación de coagulante en plantade tratamiento de agua potable zeta potential (ζ) as a criterion for optimization of coagulant dosage in a drinking water treatment plant. *DYNA*, 79, 166–172.
- Bouaouine, O., Bourven, I., Khalil, F., Bressollier, P., y Baudu, M. (2019). Identification and role of opuntia ficus indica constituents in the flocculation mechanism of colloidal solutions. *Separation and Purification Technology*, 209, 892–899. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2018.09.036>
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., y 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>

- Clavijo, J. (2013). *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)*. Elementos, 3(3), 134-146. <https://journal.poligran.edu.co/index.php/elementos/article/view/420/397>
- Daverey, A., Tiwari, N., y Dutta, K. (2019). Utilization of extracts of *Musa paradisiaca* (banana) peels and *Dolichos lablab* (Indian bean) seeds as low-cost natural coagulants forturbidity removal from water. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(33), 34177–34183. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-3850-9>
- Definicion.de. (s.f.). *Residuo - Qué es, clasificación, definición y concepto*. <https://definicion.de/residuo/>
- Gallo Castro, F. J., Maldonado Salinas, L. F. y Zuluaga Huertas, J. P. (2021). *Aprovechamiento de residuos de cáscara de cítricos en la concepción de vajillas biodegradables*. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1713/1684>
- Gheribi, R., Habibi, Y., y Khwaldia, K. (2019). Prickly pear peels as a valuable resource of added-value polysaccharide: Study of structural, functional and film forming properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 238–245. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.12.228>
- Gheribi, R., Puchot, L., Verge, P., Jaoued-Grayaa, N., Mezni, M., Habibi, Y., y Khwaldia, K. (2018). Development of plasticized edible films from *Opuntia ficus-indica* mucilage: A comparative study of various polyol plasticizers. *Carbohydrate Polymers*, 190, 204–211. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.02.085>
- Hodúr, C., Bellahsen, N., Mikó, E., Nagypál, V., Šereš, Z., y Kertész, S. (2020). The adsorption of ammonium nitrogen from milking parlor wastewater using pomegranate peel powder for sustainable water, resources, and waste management. *Sustainability*, 12(12), 4880. <https://doi.org/10.3390/SU12124880>
- Ibisi, N. E., y Asoluka, C. A. (2018). Use of agro-waste (*Musa paradisiaca* peels) as a sustainable biosorbent for toxic metal ions removal from contaminated water. *Chemistry International*. 4(1), 52-59. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1475334>
- Jiang, J. Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36–44. <https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2015.01.008>

- Koul, B., Bhat, N., Abubakar, M., Mishra, M., Arukha, A. P., y Yadav, D. (2022). Application of natural coagulants in water treatment: a sustainable alternative to chemicals. *Water* 14(22), 3751. <https://doi.org/10.3390/w14223751>
- Melgar, B., Días, M. I., Ciric, A., Sokovic, M., García-Castello, E. M., Rodríguez-López, A. D., Barros, L., y Ferreira, I. (2017). By-product recovery of *Opuntia* spp. peels: Betalainic and phenolic profiles and bioactive properties. *Industrial Crops and Products*, 107, 353–359. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2017.06.011>
- Montes Gazabón, L. E., Olivero Verbel, R. E., y Mercado Martínez, I. D. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia*, 8(1), 19–27. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552013000100003&lng=en&tlng=es
- Nath, A., Mishra, A., y Pande, P. P. (2021). A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6113–6117. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.03.551>
- Okoro, B. U., Sharifi, S., Jesson, M. A., y Bridgeman, J. (2021). Natural organic matter(NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106588. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106588>
- Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., Lara, C. R., Cifuentes, G. R., Gómez Castaño, J. A., (2022). Uso de la cáscara del fruto de *Opuntia ficus-indica* como fuente novedosa de mucílago con características fisicoquímicas/moleculares coagulantes. *Polímeros*, 14, 3832. <https://doi.org/10.3390/polym14183832>
- Oyewo, O. A., Onyango, M. S., y Wolkersdorfer, C. (2016). Application of banana peels nanosorbent for the removal of radioactive minerals from real mine water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 369–376. <https://doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2016.08.014>
- Pardo, J. S. B., Moncada, D. K. V., Martínez, L. E. R., y Ayala, S. L. G. (2020). Evaluación de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(1), 105–116. <https://doi.org/10.22490/21456453.3081>

- Pichler, T., Young, K., y Alcantar, N. (2012). Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus. *Water Science and Technology*, 179-186. <http://www.geochemie.uni-bremen.de/pdf/pichler/WS%202012%20Mucilage.pdf>.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., y 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)
- Vargas-Solano, S. V., Rodríguez-González, F., Martínez-Velarde, R., Morales-García, S. S., y Jonathan, M. P. (2022). Removal of heavy metals present in water from the Yautepec River Morelos México, using Opuntia ficus-indica mucilage. *Environmental Advances*, 7, 100160. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2021.100160>
- Yepes, S. M., Johana, L., Naranjo, M., y Sánchez, F. O. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422–4431. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472008000100018&lng=en&nrm=iso&tlng=es