

Uso del mucílago del nopal en el tratamiento de aguas para su potabilización

Ángel Sandoval Bautista¹, Karla Ximena Ávalos García², Andrea María Llamas Cervera³, Frida Magali Vázquez Domínguez⁴, Dulce Guadalupe Hernández Guerrero⁵, Nancy Edith Pacheco Guerra⁶, Yolanda Mahely Morales Padilla⁷.

Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato

a.sandovalbautista@ugto.mx¹

kx.avalosgarcia@ugto.mx²

am.llamascervera@ugto.mx³

fm.vazquezdominguez@ugto.mx⁴

dg.hernandezguerrero@ugto.mx⁵

ne.pacheco@ugto.mx⁶

mpadilla@ugto.mx⁷

Resumen

El agua destinada para uso y consumo humano es tratada para hacerla segura para la salud humana. En la primera fase de dicho tratamiento, se agrega al agua un coagulante químico, usualmente sulfato de aluminio, que ayuda a agrupar moléculas de impurezas en grandes conjuntos que son más fáciles de eliminar¹. Sin embargo, dado que el sulfato de aluminio conlleva problemas para la salud del humano a largo plazo², se ha comenzado a buscar alternativas de coagulantes químicos. El mucílago de nopal (*Opuntia spp*) destaca como alternativa en dicha búsqueda. En esta investigación, se evaluó la eficacia de los mucílagos de nopal de dos especies distintas (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) como coagulantes químicos en la potabilización del agua obtenida de la presa de la Esperanza. Se extrajo el mucílago usando un método sacado de la bibliografía³ y se siguió esa misma fuente para el tratamiento del agua con la sustancia orgánica y la inorgánica (mg de mucílago y sulfato por ml de agua, tiempo de agitación, etc.). Se tomaron en cuenta parámetros como el pH, los sólidos disueltos totales (TDS) y la conductividad eléctrica (determinados con un medidor de pH, EC y TDS hi98129) para comparar la eficacia del mucílago frente al sulfato de aluminio. Se observó que los resultados en dichos parámetros eran similares entre los tres coagulantes y eran favorables respecto a los estándares mexicanos y de la OMS. Finalmente, con apoyo de la bibliografía, los resultados obtenidos y tomando en cuenta los posibles riesgos del uso del sulfato de aluminio, se determinó que el mucílago de nopal es un coagulante químico viable en la potabilización del agua y una buena alternativa al sulfato de aluminio.

Palabras clave: Potabilización de agua, mucílago, *Opuntia ficus-indica*, *Opuntia robusta*, coagulante, nopal.

Introducción

Uno de los principales problemas que afecta a varias comunidades de la ciudad de Guanajuato Capital es la mala calidad de agua que se les administra, así como la contaminación de sus principales fuentes hídricas. Dado que el agua proviene de ríos, lagos, lluvias y manantiales, esta trae consigo impurezas, gases, polvo y microorganismos (los cuales pueden afectar la salud del ser humano) y, por ende, debe ser sometida a un proceso de potabilización haciéndola apta para el consumo humano. Las bacterias, virus y parásitos son partículas coloidales que pueden adherirse a otro tipo de materia en suspensión, generando el aumento de la turbidez y el riesgo de enfermedades gastrointestinales⁴.

Los coagulantes primarios utilizados en el proceso de potabilización del agua permanecen basados en compuestos inorgánicos convencionales de aluminio o hierro, como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio,

¹ (Servicios de Aguas de Misiones S. A., 2008)

² (Olivero et al., 2013)

³ (Olguín, 2013)

⁴ (Miller, 2008)

sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. La mayoría son sales ácidas que reducen el pH del agua por lo cual, dependiendo del agua a tratar, se necesita añadir un álcali como cal o soda cáustica⁵. Además, dichos productos químicos a veces son costosos o tienen la posibilidad de tener efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente. El sulfato de aluminio, es el coagulante químico más usado para la clarificación del agua ya que remueve los microorganismos entre un 90 y 99% al ser usado en condiciones óptimas⁴. No obstante, podría ser fácilmente asimilado por el ser humano, con potenciales secuelas negativas a largo plazo. Sus efectos se asocian con numerosas formas de cáncer, Alzheimer y patologías óseas. Una concentración de aluminio mayor a 0,1 mg/L en agua para consumo humano podría ser un factor de riesgo para la demencia y para la enfermedad de Alzheimer. Además, el sulfato de aluminio crea grandes porciones de lodos que no son viables para ser usados como biosólidos, pues impactan de manera negativa los suelos y el agua gracias a su ecotoxicidad. Por lo anterior, surge como alternativa para sustituir o minimizar el uso del sulfato de aluminio, la utilización de coagulantes naturales, como lo es el mucílago de nopal.

El nopal pertenece a la familia de las cactáceas que constituyen una de las familias botánicas más abundantes en México con una gran cantidad de géneros y especies, una extraordinaria variabilidad morfológica y de adaptación a los distintos tipos de vegetación y medios ecológicos. Desde tiempos remotos estas han sido importantes y han estado ligadas a una gran cantidad de culturas y pueblos americanos, desde la época prehispánica y hasta nuestros días. En muchas partes del mundo, se hace uso de estas de distintas maneras, algunas son alimenticias, forrajeras y otras son importantes por sus propiedades medicinales. Otros de los usos y aplicaciones que se le ha dado es en la clarificación de agua (en México y en la sierra del Perú) utilizando la savia mucilaginososa de pencas⁶. El nopal en general posee en su composición química un 60 al 95 % de agua, 11.5 % de azúcares, 1.55 % de proteínas, 3.12 % de pectinas y 0.16 % de lípidos. Las pencas de nopal excretan una sustancia “viscosa” llamada mucílago, este es uno de los componentes más importantes ya que forma parte de la fibra dietética.

El mucílago del nopal es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 g/mol. Contiene aproximadamente de 35 a 40 % de arabinosa, 20 a 25% de galactosa y xilosa cada una, y de 7 a 8% de ramnosa y ácido galacturónico cada uno⁷. El mucílago de nopal es una sustancia análoga a las gomas y se considera importante para la industria de alimentos debido a sus propiedades de viscosidad⁸. Tiene la capacidad de formar redes moleculares y retener fuertemente grandes cantidades de agua^{6, 9}, así como de modificar propiedades como viscosidad, elasticidad, textura y retención de agua. Adicionalmente, es un buen gelificante, espesante, y emulsificante¹⁰. Puesto que el mucílago está compuesto de un porcentaje considerable de polisacáridos, otras de sus propiedades incluyen una alta capacidad complejante responsable de la retención de los iones metálicos, una gran capacidad biodegradable (diferente a muchos compuestos coagulantes sintéticos) y una mínima toxicidad en polímeros naturales (sustancias que tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son usados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia con resultados satisfactorios⁶). Finalmente, una de sus propiedades de mayor interés para el tratamiento del agua es su formación de dispersiones viscosas al estar en contacto con dicho líquido⁶.

La importancia de esta investigación radica en el uso de un método de fácil extracción de mucílago de dos especies distintas de nopal (*Opuntia ficus-indica* y *Opuntia robusta*) para emplearlo como coagulante químico alternativo al sulfato de aluminio en la potabilización del agua obtenida de la presa de la Esperanza. Es por esto que se desea extraer mucílago de nopal en polvo de manera artesanal. Esta técnica utiliza equipo y material de bajo costo. Dicha metodología es fácil de utilizar y está comprobado que las propiedades del nopal pueden disminuir y hasta eliminar la contaminación presente en el agua. Por lo tanto, se pretende contribuir a la potabilización de agua para uso y consumo humano.

⁴ (Miller, 2008)

⁵ (Cogollo, 2011)

⁶ (Vázquez, 1994)

⁷ (Gibson, 1990)

⁸ (Sepúlveda, 2006)

⁹ (Ruiz, 2009)

¹⁰ (Álvarez, 2007)

Metodología

El proceso experimental se llevó a cabo en la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato. Después de llevar a cabo algunas pruebas preliminares con especies *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia monacantha*, se llegó a la conclusión de que no se seguía el proceso ideal para el objetivo que se busca, por lo que se decidió continuar con la metodología realizada en diferentes fases tomando en cuenta la bibliografía consultada³, como se detalla a continuación.

1. Extracción

- a. Selección de nopales y variedades para llevar a cabo la extracción. Se seleccionaron dos variedades de nopal, siendo *Opuntia robusta* y *Opuntia ficus-indica* con las que se trabajaron.
- b. Lavado del nopal con agua potable.
- c. Pelado manual del mismo. Se trató de no desprender la piel superficial del nopal para posteriormente pesar cada lote de este obteniendo un kilo de cada variedad.
- d. Molienda del nopal junto con agua destilada con ajustes de proporciones en función del resultado. Se hicieron 3 pruebas por cada variedad. Inicialmente se probó la proporción 1:2 durante diez minutos a la primera velocidad en una licuadora convencional, dando como resultado espuma que abarca aproximadamente un cuarto de la mezcla total. Con el objetivo de reducir este factor, se probó con la relación 275 g de nopal, 500 ml de agua destilada, seguido de la proporción 403/500 respectivamente. Posteriormente se retiró la espuma manualmente. Esto en el *Opuntia robusta*. En cuanto al *Opuntia ficus-indica*, se probó con las relaciones 300/375, 400/600 y 400/400.
- e. Calentado de la sustancia resultante del paso anterior a 90 °C por 10 minutos. En este apartado se resaltan dos momentos cualitativos de importancia en ambas variedades, pues, a partir del momento en que la mezcla alcanza temperatura de 80 °C, comienza una fase de cambio de color descartando el color verde brillante por uno opaco hasta llegar a unos tonos amarillentos cuando se alcanzan los 90 °C. De la misma manera, se mantuvo constante el pH de 7 antes y después del calentado. Así mismo, en las 3 pruebas realizadas de ambas variedades se removió constantemente al igual que se midió la temperatura de las sustancias en todo momento.
- f. Enfriamiento. A continuación, se cubrieron los recipientes para evitar contaminación y se dejaron enfriar.



Figura 1. Izquierda a derecha. Cladodios de *Opuntia ficus-indica*. Pelado de *Opuntia ficus-indica*. Licuado del nopal con agua destilada. Enfriamiento de la sustancia.

2. Separación

- a. Centrifugación. Realizada a 3500 rpm durante 20 minutos. Anterior a este paso se filtró la sustancia con gasas para descartar la fibra y facilitar la extracción del mucílago. Consecuentemente se centrifugaron todas las pruebas por igual.
- b. Desecho del precipitado. Se realizó succionando de la parte mayormente líquida y se descartó la parte precipitada de cada tubo de ensaye.



Figura 2. Izquierda a derecha. Filtrado de la sustancia con gasas. Centrifugado de la sustancia. Extracción del mucilago. Mucilago de nopal en vaso de precipitado.

3. Purificación

- Baño María. Efectuado durante 130 minutos a 65 °C en todas las pruebas por igual.
- Enfriamiento. Posterior a esto, se cubrieron los contenedores para evitar contaminación.
- Insolubilización de polímeros. Realizado con etanol al 96% en una relación 1:4 dejándose reposar a 4 °C por 48 horas. Realizado en todas las pruebas por igual sin cambio notorio aparente entre una prueba y otra.



Figura 3. Izquierda a derecha. Mucilago a baño María. Insolubilización de polímeros. Mucilago con etanol reposando.

4. Obtención de polvo

- Deshidratación. Hecha con el mezclado de etanol en estufa al vacío por 30 min. Realizado en todas las pruebas por igual. Algunas muestras se desecharon por sobrecocción.
- Raspado para la obtención de polvo. Realizado en todas las pruebas por igual.



Figura 4. Izquierda a derecha. Raspado del mucílago. Determinación de gramos de mucílago obtenidos.

5. Proceso de comprobación

- a. **Toma de medidas.** Se pesaron los productos extraídos del nopal, al igual que el sulfato de aluminio obteniendo 20 mg de polvo de mucílago de nopal de cada especie y 175 mg de sulfato de aluminio en relación con 500 ml de agua a purificar.
- b. **Mezclado.** Este se realizó con el apoyo de un agitador magnético a una velocidad constante durante 10 minutos a partir de que se le agregó el mucílago y el sulfato a cada contenedor respectivamente.
- c. **Reposo.** Se mantuvo en reposo durante 30 minutos.
- d. **Datos.** Se tomaron datos de las pruebas cuando se extrajo el agua, durante el proceso de mezclado y después del reposo.



Figura 5. Muestras de agua tratada con mucílago de *Opuntia robusta*, mucílago de *Opuntia ficus-indica* y sulfato de aluminio tras ser sometidas a agitación.



Figura 6. De izquierda a derecha. Muestras de agua tratada con mucílago de *Opuntia robusta* (vaso de precipitado a la izquierda) y con mucílago de *Opuntia ficus-indica* (vaso de precipitado a la derecha) tras reposar 30 minutos luego de la agitación. Muestra de agua tratada con sulfato de aluminio tras reposar 30 minutos luego de la agitación.

Resultados y discusión

En la tabla 1, se pueden observar los valores que el agua sin tratar y las muestras de agua tratada con los diversos coagulantes obtuvieron en parámetros como el pH, los sólidos disueltos totales (TDS) y la conductividad eléctrica. Se puede notar que los coagulantes redujeron el pH del agua, particularmente el sulfato de aluminio generó la mayor reducción. Además, en la conductividad y los TDS, se aprecia un aumento en las muestras tratadas respecto a la muestra original. Dicho incremento es explicado por Olivero et al. (2013)² como una consecuencia de la disolución de los coagulantes.

Tabla 1. Condiciones del agua sin tratar de la presa de la Esperanza, de la tratada con $Al_2(SO_4)_3$, de la tratada con mucílago de *Opuntia robusta* y de la tratada con mucílago de *Opuntia ficus-indica*.

	pH	TDS	Conductividad eléctrica
Agua sin tratar	8.17	172 ppm	345 $\mu S/cm$
Agua tratada con $Al_2(SO_4)_3$	4.18	247 ppm	494 $\mu S/cm$
Agua tratada con mucílago de <i>Opuntia robusta</i>	6.91	220 ppm	442 $\mu S/cm$
Agua tratada con mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i>	6.64	247 ppm	495 $\mu S/cm$

En la tabla 2, se pueden observar los límites establecidos y recomendados por México¹¹, la OMS y Colombia¹² en varios parámetros para considerar al agua como potable y apta para uso y consumo humano. De acuerdo con la información plasmada en la tabla 1 y 2, las muestras de agua tratadas con los mucílagos de *Opuntia robusta* y de *Opuntia ficus-indica* cumplen con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 en los parámetros de pH y TDS y, a manera de referencia, cumplen con el parámetro de conductividad de Colombia y de TDS de la OMS. Por otro lado, la muestra de agua tratada con sulfato de aluminio cumple con los límites de TDS establecidos por la OMS y México y los de conductividad establecidos por Colombia, empero, sobrepasa el límite de pH de 6.5 a 8.5 de México.

² (Olivero et al., 2013)

¹¹ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales et al., 2022)

¹² (Truque B., P. A., 2019)

Tabla 2. Recomendaciones y límites en pH, TDS y conductividad en el agua potable.

	pH	TDS	Conductividad eléctrica
México	6.5 a 8.5	1000 ppm	-
OMS	-	1000 ppm	-
Colombia	7	500 ppm	1000 $\mu S/cm$

Cabe mencionar que el agua sin tratamiento también cumple con los límites de pH, TDS y conductividad de México, la OMS y Colombia para considerarse potable, sin embargo, se infiere que la diferencia entre el agua sin tratar y las que recibieron tratamiento se encuentra en otros parámetros como la turbidez. En esta investigación, no fue posible medir la turbidez de las diversas muestras de agua, no obstante, en otros artículos que usaron al mucílago como coagulante en el proceso de potabilización del agua se mostró una reducción significativa (85.25-94.84%) de la turbidez y el color aparente en las muestras de agua tratadas respecto a las crudas^{2, 13, 14}. Así mismo, en otras investigaciones^{2, 13} los aspectos de pH, TDS y conductividad mostraron el mismo comportamiento que el expuesto en este artículo.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que, en los parámetros evaluados, ambos mucílago y el sulfato de aluminio presentan cifras similares y favorables, a excepción del pH de 4.18 obtenido con el sulfato de aluminio, respecto a los límites fijados en México y los recomendados por organizaciones como la OMS. Tomando en cuenta los resultados obtenidos y los datos aportados por la bibliografía (que muestran que la turbidez disminuye en el agua tras recibir tratamiento con mucílago), se puede inferir que el mucílago de nopal es un coagulante químico viable en el proceso de potabilización del agua. Por otro lado, cabe mencionar que, dada la demanda por agua para uso y consumo humano en México y en el mundo, es importante optimizar los procesos de tratamiento de este recurso para asegurar 1) una buena calidad y 2) que sea segura a corto y largo plazo para el humano y el medio ambiente y, en este último aspecto, el sulfato de aluminio no es viable. Existen investigaciones que muestran que este puede tener efectos perjudiciales para la salud humana a largo plazo, trayendo riesgo de enfermedades tan severas como demencia y Alzheimer^{2, 15}, por lo que es apremiante el uso de coagulantes naturales como el mucílago que no presenten riesgos severos a la salud y al medio ambiente o, en su caso, el uso combinado de coagulantes naturales con inorgánicos para reducir los daños que los últimos pueden generar de ser usados en gran medida. Así pues, el mucílago de nopal es, no sólo un coagulante químico viable, sino que también es conveniente en términos de cuidado de la salud.

² (Olivero et al., 2013)

¹³ (Almendárez de Quezada, 2004)

¹⁴ (Parra et al., 2011)

¹⁵ (Contreras et al., 2015)

Perspectivas del trabajo

En el proceso de extracción del mucílago, se empleó bastante agua potable y se obtuvo una cantidad relativamente baja de mucílago en comparación con la cantidad de nopal usado: de 999.18g de *Opuntia robusta* (sin espinas), se obtuvieron 2.96g, y, de 1005.99g de *Opuntia ficus-indica* (sin espinas), se sacó 0.34g, por lo que, es pertinente 1) evaluar si el uso de mucílago es sustentable a largo plazo y 2) realizar más investigaciones para mejorar el proceso de extracción de la sustancia orgánica y de las proporciones de gramos de mucílago por litros de agua a tratar. Se espera que futuras investigaciones puedan abordar y contribuir en los dos puntos ya mencionados para la optimización del uso del mucílago como coagulante en el proceso de potabilización del agua e inclusive en su aplicación en otras áreas.

Referencias

- Servicio de Aguas de Misiones S. A. (2008). *Proceso de Potabilización del Agua* [Archivo PDF]. [http://www.elaguapotable.com/Proceso%20potabilizaci%C3%B3n\(Sansa\).pdf](http://www.elaguapotable.com/Proceso%20potabilizaci%C3%B3n(Sansa).pdf)
- Olivero Verbel, R. E., Mercado Martínez, I. D. y Montes Gazabón, L. E. (enero-junio 2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción+Limpia*, 8(1), 19-27.
- Olguín, B. (2013). *Método para purificación de agua usando polvo de mucílago de nopal (Opuntia spp.)* [Archivo PDF]. <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/a/2013/015072>
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, J. and Zimmerman, J. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science & Technology*, 42 (12), 4274-4279.
- Cogollo, J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *Dyna*, 78 (165), 18-27.
- Vázquez González, Osvaldo. 1994. Extracción de coagulantes naturales de nopal y aplicación en la clarificación de agua superficiales. Tesis MIA. Universidad Autónoma de Nuevo León. Pág. 3-4-12.
- Gibson, C. A., Nobel, S. P. (1990). En "The cactus primer". First Harvard University Press paperback edition. Pág. 196-199.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C. Aliaga, E. and Aceituno, c. (2006). "Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp". Dto. De Agroindustria y Enología, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Chile. Santiago Chile.
- Ruiz, H. F., Guerrero, B. J. A. (2009). "Aplicación de las películas Comestibles a base de quimostato y mucílago de nopal en fresa (*Fragaria ananasa*) en refrigeración". Tesis de maestría. Ciencia en Alimentos. Universidad de las Américas Puebla. Puebla. Pág. 21-23.
- Álvarez, O. C., Díaz S. C., Ramírez V. D. y Yáñez F.J. (2007). "Secado por Aspersión de Mucílago de Nopal". IX Congreso de ciencia de los alimentos y V foro de ciencia y tecnología de alimentos. Departamento de Bioingeniería. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. IPN. Guanajuato, Gto. Pág. 277.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Salud, Secretaría de Energía, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Comisión del Agua del Estado de México, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. P. D., Organización Mundial de la Salud, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Politécnico Nacional y Universidad Autónoma de San Luis Potosí. (2 de mayo de 2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

Truque B., P. A. (2019). Armonización de los estándares de agua potable en las Américas [Archivo PDF].
<https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>

Almendárez De Quezada, N. (2004). Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del Lago de Managua "Piedras Azules". *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1), 46-54.

Parra, Y., Cedeño, M., García, M., Mendoza, I., González, Y. y Fuentes, L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *Redieluz*, 1(1), 27-33.

Contreras Lozano, K. P., Aguas Mendoza, Y., Salcedo Mendoza, G., Olivero Verbel, R. y Mendoza Ortega, G. P. (enero-junio 2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción+Limpia*, 10(1), 40-50. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v10n1/v10n1a04.pdf>