

ANA MAYELA RAMOS DE LA PEÑA*, JUAN CARLOS CONTRERAS ESQUIVEL, ÓSCAR AGUILAR JIMÉNEZ

Tecnológico de Monterrey, México
Universidad Autónoma de Coahuila, México,

Redes inteligentes a base de nopal

para la alimentación
y empaques del futuro



SOSTENIBLE



INTELIGENTE



FUNCIONAL

Biomateriales naturales que conectan
ciencia, salud y sostenibilidad.

RESUMEN

El mucílago de nopal es un biopolímero, un polisacárido heterogéneo y un hidrocoloide que tiene una amplia capacidad para atraer humedad y posee un alto peso molecular. Su arquitectura molecular puede ser modificada a través de su entrecruzamiento con genipina, un agente de origen natural que lo estabiliza y hace sus uniones más fuertes. El mucílago entrecruzado presenta una morfología que se caracteriza por redes abiertas, porosas y conectadas, completamente distinta a la del quitosán o la de la goma de algarrobo, cuyas estructuras son densas y más compactas. El mucílago tiene un gran potencial para ser utilizado en sistemas avanzados de entrega (liberación) controlada de nutrimentos hacia el organismo. Asimismo, para ser empleado en la innovación de empaques que alerten al consumidor sobre los cambios de los alimentos durante su periodo de almacenamiento (calidad). La ciencia y tecnología alimentaria permite diseñar ingredientes que a su vez sean de beneficio para nuestra salud y que favorezcan otras aplicaciones como la creación de empaques de alimentos de última generación.



INTRODUCCIÓN

El uso de ingredientes nutritivos, que sean un aporte tecnológico a la matriz alimentaria, y que además su procesamiento sea amigable con el medio ambiente, es el objetivo actual de la industria de alimentos. Por su parte, el mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) es un polímero natural, un gel y también un subproducto que requiere ser valorizado, de tal forma que los nuevos productos generados sean innovadores y amigables con el medio ambiente (Torregrosa et al., 2025).

El mucílago de nopal es un heteropolisacárido, un biopolímero localizado dentro de las pencas del nopal. Este interesante ingrediente está conformado por azúcares ácidos y neutros, por minerales tales como el calcio y el potasio, además de que posee la capacidad de absorber una gran cantidad de agua (Mannai et al., 2023).

Debido a que es un polielectrolito aniónico, es decir, que posee pequeñas cargas eléctricas que le permiten atraer agua, el mucílago de nopal forma geles con características muy particulares (Mushanganyisi et al., 2022). Por ejemplo, al estar en movimiento, el mucílago fluye con más facilidad. Esta particular característica hace que sea un ingrediente con gran potencial para recubrir nutrimentos que se degradan fácilmente.

Uno de los retos es que su estructura se hace frágil conforme pasa el tiempo (Van Rooyen et al., 2024), lo que ha llevado a investigar alternativas para poder mejorar su resistencia.

Un proceso químico conocido como entrecruzamiento, que consiste en tejer o grapar las moléculas, ha resultado favorable para incrementar la resistencia de la estructura del mucílago de nopal. De esta forma se crean redes con mayor fuerza y son estables conforme pasa el tiempo (Van Rooyen et al., 2024). Para ello, la genipina es la herramienta ideal para lograr este entrecruzamiento, ya que también es de origen natural.

LA GENIPINA COMO ENTRECruzANTE NATURAL

La genipina es un ingrediente de origen natural que permite llevar a cabo el proceso de entrecruzamiento. Es un extracto que se obtiene a partir de las frutas jagua (*Genipa americana*) o gardenia (*Gardenia jasminoides*) (Akao et al., 1994). El proceso de entrecruzamiento de la genipina con el mucílago de nopal ocurre mediante una reacción química, que puede ser detectada por un cambio de color a azul (Ramos-de-la-Peña et al., 2026).

Este cambio visual provee evidencia científica de la formación de una nueva red con mayor fuerza y unión en comparación con los Ingredientes sin entrecruzar (**Figura 1**). La genipina actúa como un agente de entrecruzamiento que une la nueva red mejorada (Ramos-de-la-Peña et al., 2026). Aunque los tres Ingredientes cambiaron de color después de la reacción con la genipina, cada uno se transformó de diferente manera.

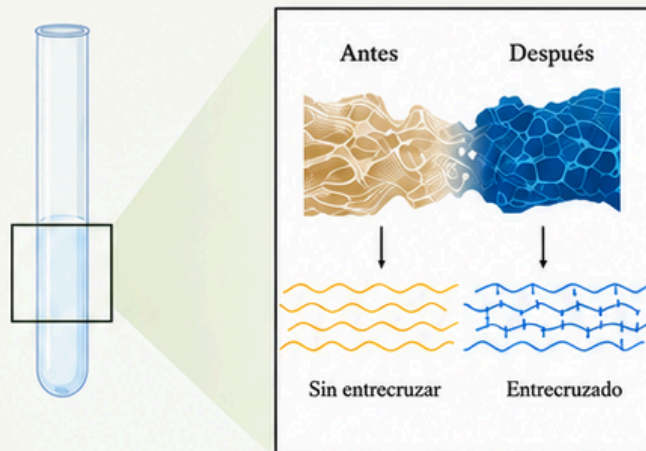


Figura 1. Imagen representativa del proceso de entrecruzamiento de mucílago de nopal con la genipina. El cambio de color a azul es la evidencia de que la reacción ocurre, transformando la estructura inicial en redes más unidas y con capacidades eléctricas mejoradas. Fuente: diseño de los autores, Biorender.



LAS CARACTERÍSTICAS ÚNICAS DEL MUCÍLAGO DE NOPAL

Cuando la forma de entrecruzamiento de cada ingrediente con la genipina fue evaluada, se observó que cada uno de ellos tuvo comportamientos muy distintos (Ramos-de-la-Peña et al., 2026) (**Tabla 1**).

El quitosán (origen: hongos, caparazones de crustáceos) y la goma de algarrobo (origen: semillas de árbol de algarrobo) presentaron una contracción en su red polimérica, lo cual es muy favorable para encapsular compuestos sensibles que necesitan ser protegidos del entorno (Ramos-de-la-Peña et al., 2026).

“

“La genipina transforma el mucílago de nopal en una red más resistente capaz de proteger compuestos bioactivos.

”

Tabla 1. Ingredientes antes y después de la reacción con genipina. Las características indican si el ingrediente protege los nutrientes o los libera: Fuente: síntesis de resultados elaborada por los autores con base en Ramos-de-la-Peña et al. (2026).

Ingrediente	Características en su estado natural	Características con genipina	Uso
Quitosán	Frágil a largo plazo	Mayor compactación y dureza	Encapsulación: cápsulas más resistentes
Goma de algarrobo	Irregularidades en su textura	Mayor suavidad y resistencia	Mejoramiento de textura de alimentos a largo plazo
Mucílago de nopal	Alta viscosidad y poco resistente	Incremento de tamaño y apertura de redes	Liberación controlada: protección de nutrientes, entrega lenta

NUEVAS APLICACIONES

Después de formar películas delgadas con cada ingrediente, y de examinar su textura casi invisible con un microscopio de fuerza atómica (AFM), el cual usa una aguja ultrafina para observar estos detalles, se obtuvo información relevante sobre estas superficies.

El quitosán y la goma de algarrobo entrecruzados presentaron superficies suaves y uniformes, lo que es importante porque les permite actuar como barreras de protección de nutrimentos. Para el mucílago del nopal entrecruzado, una mayor rugosidad fue observada, como si fuera una especie de velcro, lo cual facilita su interacción con los nutrimentos y su entrega al organismo mediante liberación controlada (Ramos-de-la-Peña et al., 2026).

Interesantemente, la conductividad eléctrica, es decir, la capacidad de los ingredientes para transmitir señales eléctricas incrementó después de la reacción con la genipina. Este hallazgo abre la oportunidad de utilizar al mucílago de nopal para desarrollar empaques de alimentos inteligentes. Por ejemplo, utilizando sensores que por medio de señales eléctricas indiquen cuando un alimento presenta deterioro, como la oxidación o el crecimiento de microorganismos, incluso antes de que podamos percibirlo mediante la vista o el olfato (Roy & Rhim, 2022).

RUMBO A UNA TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS MÁS SOSTENIBLE

Además de crear ingredientes inteligentes, es necesario procurar un futuro más sostenible. El uso de ingredientes como el mucílago de nopal está en el contexto de las tecnologías biodegradables y sustentables. Asimismo, el uso de estos ingredientes (mucílago de nopal, quitosán y goma de algarrobo) se encuentra dentro del contexto de los objetivos de desarrollo sustentable de la Organización de las Naciones Unidas (Trombetta et al., 2006).

Debido a que son ingredientes naturales, son amigables con el medio ambiente. Los hallazgos compartidos en este artículo establecen las bases para el desarrollo de nuevos productos que utilicen estos ingredientes inteligentes, en donde la ciencia y tecnología de alimentos potencializa sus atributos naturales.

CONCLUSIÓN

La ciencia y tecnología de alimentos tiene un rol de gran relevancia en la actualidad, especialmente en el desarrollo de alimentos que sean más saludables y sostenibles para nuestra vida diaria.

Los hallazgos mencionados muestran que la innovación puede surgir aún de los ingredientes más tradicionales. El mucílago de nopal entrecruzado, al compararse con otros biopolímeros, forma redes más abiertas, lo cual es una característica muy importante y única para el desarrollo de alimentos innovadores.

Esta tecnología tiene un impacto real en la alimentación actual y en nuestro planeta. Por una parte, puede hacer más eficiente nuestra alimentación mediante un sistema de liberación lenta de nutrimentos, asegurando que el beneficio de cada compuesto se mantenga constante y conserve su efectividad a través del tiempo. Por otro lado, nos puede alertar sobre la frescura de los alimentos con empaques inteligentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akao, T., Kobashi, K., & Aburada, M. (1994). Enzymic studies on the animal and intestinal bacterial metabolism of Geniposide. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 17(12), 1573–1576. <https://doi.org/10.1248/bpb.17.1573>

Mannai, F., Elhleli, H., Yilmaz, M., Khiari, R., Belgacem, M.N., & Moussaoui, Y. (2023). Precipitation solvents effect on the extraction of mucilaginous polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): structural, functional and rheological properties. *Industrial Crop and Products*, 202, 117072. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117072>

Mushanganyisi, D., De Wit, M., Du Toit, A., Bothma, C., Hugo, A., & Venter, S.L. (2022). Functional properties of cactus pear mucilage: gelling and spherification. *ISHS Acta Horticulturae*, 1343. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1343.63>

Van Rooyen, B., De Wit, M., Osthoff, G., & Van Niekerk, J. (2024). Cactus Pear mucilage (*Opuntia* spp.) as a novel functional biopolymer: mucilage extraction, rheology and biofilm development. *Polymers*, 16(14), 1993. <https://doi.org/10.3390/polym16141993>

Ramos-de-la-Peña, A.M., Contreras-Esquivel, J.C., Aguilar, O. (2026). Impact of genipin and temperature on the physicochemical and structural properties of nopal mucilage, water-soluble chitosan, and locust bean gum. *European Food Research and Technology*. 252, 43. <https://doi.org/10.1007/s00217-025-04941-5>

Roy, S., & Rhim, J-W. (2022). Genipin-crosslinked Gelatin/Chitosan-based functional films incorporated with Rosemary essential oil and Quercetin. *Materials*, 15(11), 3769. <https://doi.org/10.3390/ma15113769>

Torregrosa, F., Pollon, M., Liguori, G., Gargano, F., Albanese, D., Malvano, F., Cinquanta, L. (2025). Rheological and physical properties of mucilage hydrogels from cladodes of *Opuntia ficus-indica*: comparative study with pectin. *Gels*, 11, 556.

Trombetta, D., Puglia, C., Perri, D., Licata, A., Pergolizzi, S., Lauriano, E.R., De Pasquale, A., & Bonina, F.P. (2006). Effect of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) cladodes on the healing of dermal wounds in the rat. *Phytomedicine*, 13(5), 352–358. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2005.06.006>

