

Hidrogel de quitosano para robótica blanda y aplicaciones biomédicas

Salvador Enrique Lobato Larios^{1*}

¹ Instituto de Ciencias Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca

* Dirección para correspondencia: slobato007@gmail.com

Anteriormente considerado como un material de desecho formado a partir de caparazones de crustáceos e insectos, el quitosano es ahora reconocido como un material moderno, útil y versátil. El quitosano se obtiene al eliminar químicamente los grupos acetilo del polímero natural de la quitina por medio de la desacetilación. El resultado es un polisacárido con tolerancia biológica favorable, que el cuerpo suele aceptar y que, tras cumplir su función, puede degradarse de forma natural. Cabe señalar que estos atributos pueden variar según la pureza del material, el grado de desacetilación y la formulación empleada, por lo que su desempeño y seguridad deben evaluarse caso por caso. En formulaciones adecuadas, el quitosano puede formar hidrogeles capaces de contener grandes volúmenes de agua sin disolverse y reaccionar a estímulos externos; por ejemplo, se expande en respuesta a medios ácidos y se contrae en un medio básico. Puede convertir señales de su entorno en movimiento o liberar de manera dosificada una sustancia. Por consiguiente, el quitosano es un material apropiado para la robótica blanda (láminas que se doblan como “músculos” suaves), actuadores inteligentes (microválvulas que abren y cierran sin motores) y sistemas de liberación controlada

de fármacos (cápsulas que sueltan el medicamento justo cuando y donde se necesita).

El quitosano resulta ser una opción viable en ciertos escenarios, en virtud de su respuesta estímulo-detección, que puede ser utilizada en actuadores blandos y en sistemas de liberación. Sin embargo, es importante mencionar que su rendimiento dependerá del diseño y la química del entorno en que esté inmerso. Su versatilidad y sensibilidad lo sitúan como una buena opción para dispositivos portátiles, implantes que se adaptan al cuerpo humano y microactuadores autónomos que pueden realizar su trabajo en silencio. Estos sistemas no funcionan “sin energía”, sino que emplean fuentes energéticas distintas a los motores tradicionales, como gradientes químicos u osmóticos, o estímulos externos (p. ej., campos magnéticos cuando se incorporan partículas funcionales). La Figura 1 muestra la estructura química comparativa de la quitina y el quitosano.

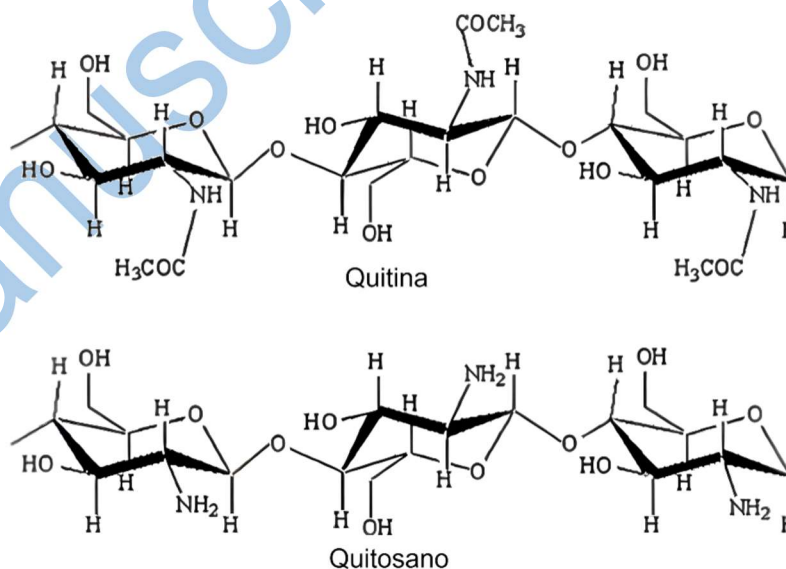


Figura 1. Estructura molecular de la quitina y el quitosano (Baharlouei *et al.*, 2022).

El quitosano se obtiene al quitarle a la quitina unas partes químicas llamadas grupos acetilo; con ello quedan al descubierto grupos amino ($-NH_2$), que son los que le dan su capacidad de responder al entorno. Cuando el ambiente es ácido, esos grupos se cargan positivamente ($-NH_3^+$), las cadenas del material se empujan entre sí, entra más agua y el hidrogel se expande. Si el ambiente pasa a ser básico, esas cargas desaparecen, las cadenas se acercan, sale agua y el material se encoge, como se muestra en la Figura 2. Esta expansión y contracción hace del quitosano un material “inteligente”, capaz de cambiar de forma y volumen según el lugar en donde se encuentre, y generar movimiento sin necesidad de motores. Esto se logra al convertir la energía del entorno en deformación mecánica; es decir, sin la necesidad de motores, pero sí de una fuente de activación.

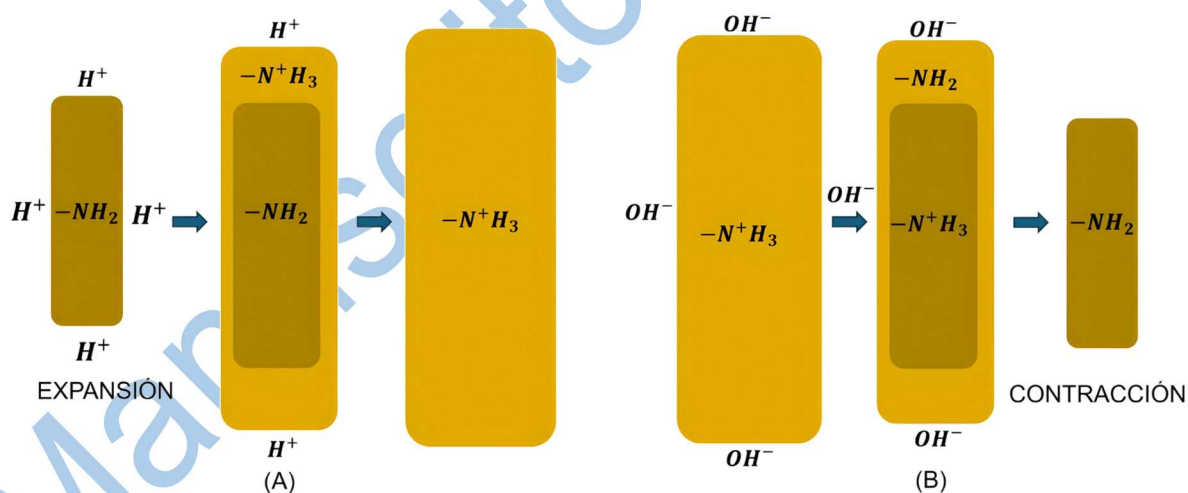


Figura 2. (A) Expansión y (B) contracción del hidrogel de quitosano.

Aplicaciones biomédicas del quitosano

Dado que el quitosano presenta buena compatibilidad biológica, puede degradarse de forma natural y muestra propiedades mucoadhesivas, tiene muchas aplicaciones en medicina. Algunas de las más comunes son la liberación controlada de fármacos llevada a cabo por microesferas y nanopartículas de quitosano que pueden encapsular múltiples medicamentos y liberarlos de forma selectiva en respuesta al pH. También ayuda a la regeneración de tejidos, utilizándose como una base sobre la cual las células pueden crecer y contribuir a la cicatrización y reparación de tejidos blandos.

Se han llevado a cabo ensayos clínicos prospectivos, aleatorios y multicéntricos en 287 pacientes, comparando una pasta hidrogel derivada de quitosano (CDHP) frente a un hidrogel hidroactivo comercial (CHG) para la curación del interior de heridas profundas, y hallaron eficacia comparable entre ambos, lo que apoya el uso clínico del quitosano como alternativa segura en el manejo avanzado de heridas (Nasir *et al.*, 2023). Como en toda investigación clínica, el alcance de esta conclusión depende de factores como la muestra, el seguimiento y los resultados evaluados; por lo tanto, el estudio se interpreta como un apoyo relevante para este escenario, pero no como conclusión aplicable para todas las formulaciones de quitosano.

También se han desarrollado nanopartículas magnéticas recubiertas con quitosano, capaces de transportar y liberar un fármaco antitumoral de origen vegetal

dependiendo del pH de la zona en la que se encuentren. Los estudios *in vitro* muestran una gran eficacia para combatir las células de cáncer de mama y una citotoxicidad mínima para las células sanas, lo que refuerza el potencial del quitosano como plataforma para la administración de fármacos antitumorales (Taherian *et al.*, 2021). Sin embargo, esta conclusión debe interpretarse como una evidencia preliminar del potencial y del desempeño observado bajo condiciones controladas, pero no como confirmación de seguridad ni de resultados clínicos. Para sostener esas afirmaciones se requieren estudios *in vivo* y, posteriormente, investigaciones en humanos.

Desai *et al.* (2023) ofrecen una revisión sobre el quitosano, en la que se destacan las ventajas de utilizar este biopolímero como una opción bien tolerada por el organismo y capaz de descomponerse con el tiempo, con un futuro esperanzador como vehículo para la liberación de fármacos mediante diferentes modalidades de administración, como vía oral, ocular, transdérmica, nasal y vaginal. Los autores también proporcionan una descripción general de las aplicaciones clínicas de materiales médicos hechos de quitosano, como los apósitos y los soportes para ingeniería de tejidos (“andamios”). Estos últimos se utilizan en la regeneración de huesos, cartílago, córnea y tejido periodontal. Utilizando el ejemplo de esta regeneración, los autores explican que, al hacer modificaciones químicas, se pueden cambiar las propiedades críticas de los quitosanos, como la solubilidad, la mucoadhesión y la capacidad de respuesta al estímulo, lo que lleva a una liberación de fármacos más dirigida y sostenida; además, puede favorecer la

regeneración de los tejidos. Esta evidencia respalda su uso como base de sistemas inteligentes en medicina y ofrece un marco directo para conectar las propuestas de actuadores blandos con escenarios clínicos reales. Con el fin de evitar cualquier extrapolación de los resultados obtenidos en el laboratorio a escenarios reales, es esencial establecer un claro concepto de *posibilidad tecnológica* en relación con *aplicación real*.

Por otro lado, se resalta la utilización de nanopartículas de quitosano y sus derivados como sistemas de liberación controlada y dirigida, con énfasis en las características mucoadhesivas, la respuesta a cambios de pH, la sensibilidad a la temperatura y las modificaciones químicas, a fin de optimizar las propiedades de absorción, biodisponibilidad y selectividad. Tales procedimientos buscan aplicaciones en oncología y vacunas, acompañadas por procesos de cicatrización de heridas e ingeniería de tejidos (Biswas *et al.*, 2025). Los trabajos de Yun y colaboradores (2024) consistieron en la evaluación de un canal biodegradable compuesto por colágeno y quitosano como vehículo para células madre neuroepiteliales, en un modelo de lesión transectada del nervio ciático en ratas. Los autores comunican una mejor recuperación funcional, es decir, mejor conducción nerviosa y mayor capacidad de regeneración, comparando con un canal sin células madre; adicionalmente, el canal compuesto por colágeno y quitosano se degradó completamente en 14 semanas. Estos hallazgos se basan en un modelo animal, que ayuda a entender el desempeño en contextos fisiológicos; sin embargo, el paso final es comprobarlo en humanos.

Quitosano como actuador en robótica blanda

En el campo de la robótica blanda, el quitosano se ha explorado con buenos resultados para fabricar músculos artificiales, microválvulas y micropinzas. Gracias a su comportamiento dependiente del pH y a la respuesta a los líquidos iónicos, las láminas de quitosano pueden doblarse, estirarse o contraerse, imitando movimientos musculares naturales. En varios estudios, pequeños robots blandos han sido diseñados mediante la utilización de hidrogel, junto con partículas magnéticas diminutas. Se ha observado que, al aproximar un imán desde el exterior, estos microrrobots pueden doblarse y deslizarse sin tocarlos. En simulaciones se efectuaron movimientos precisos, tales como arrastres, que pueden resultar útiles en situaciones de emergencia, como, por ejemplo, ayudar a deshacer un coágulo (Wang *et al.*, 2025). En este caso, se deben distinguir los diversos niveles de evidencia, ya que la simulación no es equivalente a una aplicación real, la cual requiere más pruebas de control, seguridad y desempeño.

En una investigación llevada a cabo por Maiz y sus colaboradores (2022) se describe un hidrogel de quitosano que puede ser impreso en 3D, cuya formación de gel inducida por pH (mediante baños de NaOH) permite fabricar piezas con geometría a la medida que conservan la inteligencia del material. Después de optimizar parámetros de impresión como viscosidad, velocidad y altura de capa, las estructuras resultantes reproducen la respuesta al pH descrita en la sección anterior, y presentan flexión inducida eléctricamente por transporte iónico. Estas

estructuras son actuadores blandos funcionales (láminas que se doblan, microválvulas y músculos micrométricos). El término “transporte iónico” se refiere al movimiento de iones en el material hidratado. Por su parte, “flexión inducida eléctricamente” se refiere a una curvatura producida al aplicar un estímulo eléctrico que redistribuye esos iones y el agua, generando una deformación. Estas estructuras impresas son compatibles con células y se degradan poco a poco. Por lo tanto, pueden usarse como soporte para la creación de tejido y como implantes que cambian de forma dependiendo del medio. No obstante, su rendimiento real dependerá de su estabilidad mecánica (por ejemplo, fragilidad y resistencia), su comportamiento en un ambiente fisiológico (por ejemplo, un valor de pH cercano a la neutralidad, presencia de sales y proteínas), y los requisitos de esterilización y regulación en aplicaciones de contacto directo y prolongado con tejidos.

Basu *et al.* (2024) presentan una revisión sobre diferentes tecnologías en la creación de músculos artificiales y sensores en la rehabilitación, particularmente en la medición, modelado y asistencia de la función muscular mediante exoesqueletos, actuadores y dispositivos portátiles. Su investigación sirve como una guía sobre cómo situar la creación de actuadores blandos de quitosano dentro del contexto clínico e ingenieril. Abarca desde la adquisición de parámetros musculares hasta la evaluación de funciones musculoesqueléticas, la implementación de sensores corporales, y la asistencia a la recuperación y seguimiento del paciente. Destacan los materiales y tecnologías más comunes en la robótica blanda, como el hidrogel y el híbrido polímero-conductor.

Perspectivas futuras

En los próximos años, el desarrollo del quitosano en los campos de la biomedicina y la robótica blanda no dependerá tanto de la demostración de su capacidad de movimiento, sino más de resolver estas preguntas prácticas: su capacidad de controlar su respuesta, la estabilidad del material en su entorno fisiológico y la fabricación de dispositivos reproducibles. En el caso de los actuadores blandos, por ejemplo, no se trata solo de lograr doblar una lámina, sino hacerlo de manera repetida a lo largo de varios ciclos, preservando su integridad mecánica sin volverse frágil con el uso. En el campo médico, por otra parte, el entorno real es a menudo más exigente que el laboratorio. Por ello la tendencia actual es hacia sistemas híbridos en los cuales el quitosano se combina con líquidos iónicos, nanopartículas u otros polímeros.

Un ejemplo en esta dirección es el empleo del quitosano carboximetilado en combinación con MXenes, láminas ultrafinas y conductoras cuya superficie posee una alta afinidad por el agua y facilita la absorción de humedad por parte del material. Una vez hidratado, cambia por efecto interno, lo que se traduce en hinchamiento. Si la humedad incide predominantemente en un solo lado del material, en el lado opuesto se produce hinchamiento en menor medida. Esto origina una curvatura por expansión desigual. Adicionalmente, la película no es del mismo espesor en todas las zonas de su longitud, por lo que el material se curva en la dirección en la que es mecánicamente más favorable hacerlo. Esta forma de

activación, basada en estímulos del entorno, es la que se asocia con el término “bajo consumo de energía”, que no hace referencia a cero consumo. En este caso se entiende como activación por el gradiente de humedad, sin necesidad de motores. Sin embargo, el empleo práctico de estos híbridos depende del comportamiento sostenido en el tiempo (Xu *et al.*, 2025).

Asimismo, es importante situar al quitosano frente a otros hidrogeles ya consolidados como el alginato, el PEG y la poliacrilamida, que tienden a tener características más estables y comparables entre preparaciones o mayor resistencia estructural. Así, el quitosano puede ofrecer ventajas específicas, como la posibilidad de ajustar su química y su capacidad mucoadhesiva, pero su selección tendrá sentido solo cuando esas ventajas se traduzcan en mejoras medibles en seguridad, control y desempeño para un escenario concreto. En conclusión, el futuro del quitosano no es solo la generación de nuevos materiales, sino la capacidad de transformar las pruebas de concepto en dispositivos confiables, validados y aptos para su implementación práctica.

Referencias

Baharlouei P and Rahman A (2022). Chitin and Chitosan: Prospective Biomedical Applications in Drug Delivery, Cancer Treatment, and Wound Healing. *Marine Drugs* 20:460. DOI: <https://doi.org/10.3390/md20070460>.

Basu V, Cheng L and Zheng B (2024). Technologies and Sensors for Artificial Muscles in Rehabilitation. *Sensors* 24(23):7532. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24237532>.

Biswas R, Mondal S, Ansari MA *et al.* (2025). Chitosan and Its Derivatives as Nanocarriers for Drug Delivery. *Molecules* 30(6):1297. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30061297>.

Desai N, Rana D, Salave S *et al.* (2023). Chitosan: A Potential Biopolymer in Drug Delivery and Biomedical Applications. *Pharmaceutics* 15:1313. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15041313>.

Maiz-Fernández S, Pérez-Álvarez L, Silván U *et al.* (2022). pH-Induced 3D Printable Chitosan Hydrogels for Soft Actuation. *Polymers* 14(3):650. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14030650>.

Nasir NAM, Saad AZM, Bachok NSA *et al.* (2023). A Prospective Multicenter Randomized Controlled Trial to Evaluate the Efficacy of Chitosan Hydrogel Paste in Comparison to Commercial Hydroactive Gel as a Wound Bed Preparation. *Indian Journal of Plastic Surgery* 56(01):044-052. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-0042-1759503>.

Taherian A, Esfandiari N and Rouhani S (2021). Breast cancer drug delivery by novel drug-loaded chitosan-coated magnetic nanoparticles. *Cancer Nano* 12:15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12645-021-00086-8>.

Wang J, Liu B, Li K *et al.* (2025). Magnetic Actuation Analysis of Chitosan Hydrogel Robots for Emergency Medical Applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 22: 4548-4558. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3315482>.

Xu L, Ling Y, Li Z *et al.* (2025). MXene/Carboxymethyl Chitosan Moisture Responsive Soft Actuator with Diode-Like Actuation for Versatile Applications Driven by Human Metabolism. *Advanced Science* e07845. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.202507845>.

Yun C, Li W, Qiao Y *et al.* (2024). Collagen protein-chitosan nerve conduits with neuroepithelial stem cells promote peripheral nerve regeneration. *Scientific Reports* 14:20748. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71435-x>.