

HIDROGELES: MATERIALES INTELIGENTES QUE ALMACENAN AGUA Y TRANSFORMAN LA AGRICULTURA

*HYDROGELS: SMART MATERIALS THAT STORE WATER
AND TRANSFORM AGRICULTURE*

RESUMEN

La agricultura es uno de los sectores productivos que más agua consume. Sumado al crecimiento acelerado de la población en los últimos años, esto ha generado una creciente preocupación por la gestión eficiente del recurso hídrico y por una posible escasez futura. En este contexto, se han impulsado diversas tecnologías orientadas a optimizar el uso y la conservación del agua, entre las cuales destaca el empleo de hidrogeles. Los hidrogeles son matrices poliméricas capaces de absorber grandes cantidades de agua y liberarlas gradualmente. Esta propiedad disminuye la necesidad de riego frecuente y favorece la germinación de semillas, el desarrollo de plántulas y raíces, así como la supervivencia de las plantas. Además, contribuyen a reducir la erosión del suelo y la aplicación excesiva de fertilizantes y pesticidas. Estos materiales pueden ser de origen sintético o natural. Los hidrogeles sintéticos están constituidos principalmente por polímeros y copolímeros de acrilamidas y derivados de ácido acrílico, lo que les confiere alta resistencia mecánica y gran capacidad de retención de agua; sin embargo, presentan baja degradabilidad, lo que implica un mayor impacto ambiental. Por esta razón, ha surgido interés en desarrollar hidrogeles de origen natural, elaborados a partir de polímeros naturales, como los polisacáridos. Aunque estos últimos suelen ser menos resistentes, diversos estudios han demostrado que son biodegradables, lo que reduce su impacto ambiental al descomponerse en condiciones naturales. Por lo tanto, aquí se presenta una breve descripción de estos materiales, así como el panorama actual sobre su uso, particularmente, en la agricultura.

Palabras clave: hidrogeles; polisacáridos; agricultura; maíz.

MELÉNDEZ ORTIZ, Héctor Iván

SÁNCHEZ OROZCO, Jorge Luis

BETANCOURT GALINDO, Rebeca

PUENTE URBINA, Bertha Alicia

VERA REYES, Ileana

Centro de Investigación en
Química Aplicada. Saltillo,
Coahuila, México.

Correspondencia

hector.melendez@ciqa.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0560-6875>

Fecha de recepción

21 de abril de 2026.

Fecha de aceptación

30 de septiembre de 2026.

ABSTRACT

Agriculture is one of the most water-intensive productive sectors. Combined with rapid population growth in recent years, this has raised increasing concerns about efficient water management and the potential for future water scarcity. In this context, various technologies have been developed to optimize water use and conservation, among which the application of hydrogels has gained significant attention. Hydrogels are polymeric matrices capable of absorbing large amounts of water and releasing it gradually. This property reduces the need for frequent irrigation and promotes seed germination, seedling and root development, and overall plant survival. Additionally, they help reduce soil erosion and prevent the excessive application of fertilizers and pesticides. These materials can be either synthetic or natural. Synthetic hydrogels are primarily composed of polymers and copolymers of acrylamide and acrylic acid, which provide high mechanical strength and excellent water retention capacity. However, they exhibit low degradability, leading to greater environmental impact. For this reason, interest has grown in developing natural-origin hydrogels made from polymers such as polysaccharides. Although these materials are generally less mechanically robust, studies have shown that they are biodegradable, thereby reducing their environmental impact as they decompose under natural conditions. Therefore, a brief description of these materials is presented here, along with a current overview of their use, particularly in agriculture.

Keywords: hydrogels; polysaccharides; agriculture; corn

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la población mundial ha incrementado notablemente la demanda de agua potable en los sectores industrial, doméstico y, especialmente, agrícola. De hecho, la agricultura consume cerca del 70 % del agua dulce disponible, lo que ha impulsado la búsqueda de estrategias para producir más alimentos con menos agua.

Entre las alternativas que han despertado mayor interés se encuentran los hidrogeles, materiales capaces de absorber y retener grandes cantidades de agua para liberarla gradualmente en el suelo. Lo cual ayuda a mantener la



humedad en las raíces de las plantas por más tiempo, reduciendo la frecuencia de riego y mejorando el aprovechamiento del recurso hídrico.

En la actualidad, existen tecnologías que optimizan el uso del agua en el campo, como los sistemas de riego por goteo o las microaspersoras de baja presión, a menudo combinados con películas plásticas que reducen la evaporación. Estas técnicas han demostrado ser eficientes, pero su implementación suele centrarse en cultivos de alto valor, ya que requieren una inversión inicial, mantenimiento constante y capacitación especializada.

En este contexto, los hidrogeles surgen como una opción complementaria y potencialmente accesible. En particular, los hidrogeles elaborados a partir de polímeros naturales, como los polisacáridos, han destacado por su abundancia, biocompatibilidad e inocuidad ambiental.

Uno de los principales desafíos radica en que muchos de los hidrogeles utilizados actualmente son de origen sintético. Aunque son eficaces en la retención de agua, su baja biodegradabilidad y la posible presencia de compuestos tóxicos han generado inquietud ambiental y sanitaria. Por ello, la investigación científica se ha enfocado en evaluar alternativas basadas en polisacáridos y estudiar su efecto en la germinación y la calidad de las plántulas. Uno de los objetivos principales en este campo de estudio es desarrollar materiales que no solo mejoren la eficiencia del riego, sino que también reduzcan el impacto ambiental y brinden mayor tranquilidad a productores y consumidores.

HIDROGELES

Los hidrogeles son redes tridimensionales de polímeros capaces de hincharse al entrar en contacto con el agua u otro líquido (figura 1). A nivel microscópico, estas redes contienen poros que permiten la difusión del líquido. Por eso, estos materiales han despertado gran interés en varios campos de investigación científica, como medio ambiente, industria farmacéutica, agricultura, etc.

La clave de su comportamiento radica en dos factores principales: su densidad de entrecruzamiento (qué tan unidas y cercanas están sus cadenas) y su hidrofiliidad (su afinidad por el agua). De esta manera, cuanto mayor sea la



afinidad por el agua y más adecuada sea la estructura de su red, mayor será su capacidad para almacenarla.

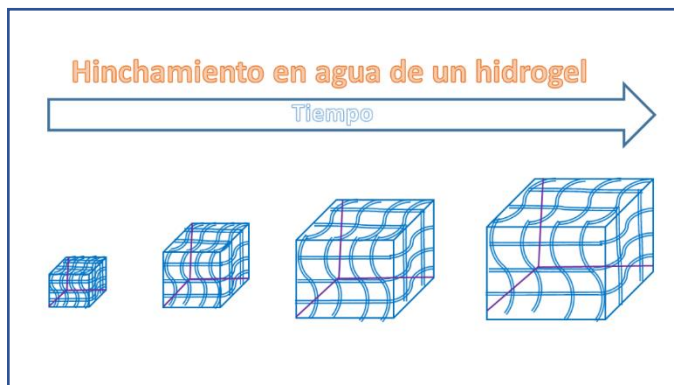


Figura 1. Representación esquemática de una red 3D de un hidrogel y su hinchamiento en agua.

¿Pero por qué y cómo absorben los hidrogeles el agua? Para contestar a esta pregunta, tendremos que adentrarnos en el mundo de la química, en particular, conocer los diferentes grupos funcionales que pueden estar presentes en las estructuras de estos materiales, entre los cuales se encuentran: hidroxilos ($-\text{OH}$), carboxilos ($-\text{COOH}$), amidas ($-\text{CONH}_2$), sulfónicos ($-\text{SO}_3\text{H}$), etc.

Cuando el hidrogel entra en contacto con agua, se establece un equilibrio entre las fuerzas osmóticas (que empujan el agua hacia el interior) y las fuerzas elásticas internas (que se oponen a la expansión). El hinchamiento máximo se alcanza cuando ambas fuerzas se equilibran. Pero si el material se seca, la red colapsa y expulsa el agua, un proceso que puede ser reversible.

Un ejemplo clásico de estos materiales es el poliacrilato de sodio, que presenta grupos carboxilato en su estructura y puede absorber hasta 200 veces su masa en agua (Dorman et al., 2018). Sin embargo, muchos de estos hidrogeles sintéticos se elaboran a partir de derivados del petróleo (como el ácido acrílico o la acrilamida), lo que plantea problemas de degradación y de acumulación de microplásticos.

HIDROGELES A BASE DE POLISACÁRIDOS

Los polisacáridos son grandes moléculas formadas por la unión de muchos azúcares simples, conectados entre sí mediante enlaces glucosídicos (figura 2). Es decir, son largas cadenas construidas a partir de pequeñas piezas que, al unirse, adquieren nuevas propiedades y funciones.

De hecho, un enlace glucosídico puede definirse como un “puente químico” que une dos moléculas de azúcar para formar estructuras más grandes. Se forma cuando el grupo funcional de un azúcar reacciona con el de otro, liberando una molécula de agua durante la reacción. Como resultado, ambos azúcares quedan unidos por un enlace estable que puede dar lugar a cadenas largas y ramificadas.

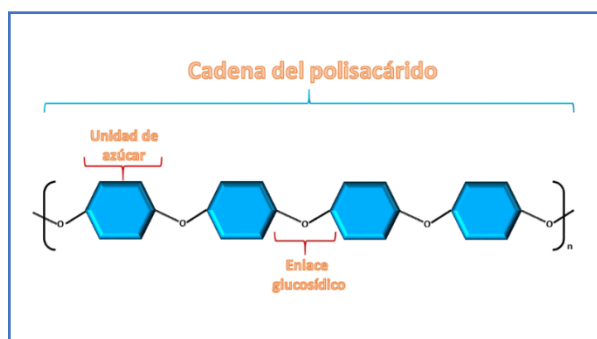


Figura 17. Representación esquemática de una cadena de polisacárido.

En los últimos años, la atención se ha centrado en hidrogeles elaborados a partir de polisacáridos como el almidón, el alginato, el quitosano y la carboximetilcelulosa, entre otros. Estos polímeros naturales presentan ventajas importantes frente a los sintéticos, entre las cuales se encuentran su biodegradabilidad, baja toxicidad, abundancia natural y menor impacto ambiental (Khan et al., 2020), lo cual los hace atractivos para su uso en agricultura, particularmente en zonas áridas o con escasez de agua, donde puedan actuar como “esponjas inteligentes” para proporcionar humedad al suelo y proveer otras ventajas como las mostradas en la figura 3.



Figura 3. Principales ventajas de los hidrogeles en la agricultura.

Estas “esponjas inteligentes” pueden absorber agua durante la lluvia o el riego, reteniéndola en el suelo y, posteriormente, liberarla gradualmente según la demanda de las raíces o las condiciones climáticas. Sin embargo, los hidrogeles a base de polisacáridos presentan ciertas desventajas frente a los sintéticos, tales como propiedades mecánicas y térmicas inferiores, menor capacidad de hinchamiento y mayor susceptibilidad a la contaminación por bacterias u hongos (Mikhailidi et al., 2024).

Para evitar algunas de estas desventajas, se han desarrollado hidrogeles híbridos que combinan polímeros naturales con sintéticos, por ejemplo, hidrogeles de alcohol polivinílico/quitosano y de acrilamida/carboximetilcelulosa (Jayanudin et al., 2024; Sultan & Taha, 2024). Se ha observado que estos materiales permiten la liberación controlada de fertilizantes y agroquímicos, mejoran la aireación del suelo, reducen la erosión y disminuyen la frecuencia de riego.

En este contexto, los hidrogeles a base de polisacáridos han surgido como materiales prometedores para mejorar el crecimiento y el rendimiento del maíz, uno de los cultivos más importantes del mundo. Durante la última década, diversos estudios han explorado cómo estos materiales pueden actuar como “reservorios inteligentes” en el suelo.

ESTUDIOS SOBRE EL DESARROLLO DE HIDROGELES A BASE DE POLISACÁRIDOS Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE MAÍZ

Uno de los primeros antecedentes relevantes fue reportado por Ibrahim et al. (2015), quienes desarrollaron un hidrogel a partir de residuos de la cosecha de arroz, aprovechando principalmente la lignina residual. En ensayos de campo con *Zea mays* cultivado en suelos salinos, los resultados mostraron un aumento significativo en la absorción de agua y en la concentración de nutrientes en comparación con suelos sin hidrogel. Esto evidenció el potencial de convertir desechos agrícolas en herramientas para la recuperación de suelos degradados. Sin embargo, no todos los estudios han mostrado efectos positivos. Chen et al. (2016) analizaron el impacto de los hidrogeles en la germinación y el desarrollo del maíz en distintos sistemas (macetas e

hidroponía). Los resultados revelaron que, a altas concentraciones, algunos hidrogeles inhibieron el crecimiento y alteraron la morfología radicular, lo que provocó desorganización celular y daño en el parénquima. Esto dejó claro que la dosis y la composición del material son factores críticos. Elbarbary y Ghobashy (2017) sintetizaron hidrogeles superabsorbentes de poliacrilamida combinados con alginato y/o quitosano mediante irradiación gamma. Las plantas tratadas con poliacrilamida/alginato mostraron un incremento de hasta 50 % en el rendimiento de grano. Estos resultados sugieren que la incorporación de polisacáridos puede mejorar la compatibilidad del hidrogel con el sistema suelo-planta. En 2020, Mazloom et al. estudiaron hidrogeles basados en lignina en condiciones de sequía. Las plantas de maíz cultivadas en suelos tratados mostraron una mayor biomasa y un mayor contenido de fósforo, lo que confirma que estos materiales pueden actuar como reservorios estratégicos de agua bajo estrés hídrico.

Más allá de retener agua, los hidrogeles también pueden servir como sistemas de liberación lenta de agroquímicos. Ghobashy et al. (2023) desarrollaron un hidrogel ultraabsorbente basado en hidroxietilcelulosa y acrilamida para liberar urea de manera controlada. El material retuvo agua durante 28 días y mejoró el crecimiento de plántulas de *Zea mays* bajo distintos niveles de estrés hídrico. Lv et al. (2024) sintetizaron un hidrogel de carbamato de almidón modificado con alginato para liberar urea de forma gradual, lo que promovió el crecimiento de plántulas. Ese mismo año, Lima-Tenório et al. (2024) encapsularon *Azospirillum brasilense*, una bacteria promotora del crecimiento vegetal, en hidrogeles de goma arábica). Encontraron que las semillas de maíz tratadas con estos hidrogeles mostraron un mayor crecimiento en el área (20 %) y el volumen radicular (60 %), así como en el tallo y el peso fresco. Este enfoque combina la ciencia de materiales y la microbiología agrícola, lo que reduce la dependencia de los fertilizantes químicos.

Más recientemente, Zhang et al. (2025) desarrollaron un hidrogel de quitosano con arcilla laponita para liberar pesticidas de forma controlada. El sistema mostró eficacia frente a los patógenos *Setosphaeria turcica* y *Botrytis cinerea*. Además de su acción antifúngica, el hidrogel reguló el crecimiento vegetal sin dañar las células sanas.

Recientemente, en nuestro grupo de trabajo se han estado elaborando hidrogeles estrictamente a base de mezclas de polisacáridos, en particular maltodextrina, quitosano y alginato, con el fin de obtener materiales con una red tridimensional adecuada, capaces de favorecer el crecimiento de semillas

de maíz. Además, en un contexto de cambio climático y de escasez hídrica, estos materiales podrían convertirse en aliados clave para una agricultura más resiliente y sostenible.

CONCLUSIONES

Frente al desafío global de producir más alimentos con menos agua, los hidrogeles se perfilan como una herramienta innovadora y versátil para la agricultura del futuro. Su capacidad para actuar como reservorios de humedad en el suelo no solo permite optimizar el uso del recurso hídrico, sino también mejorar la disponibilidad de nutrientes, proteger a las plantas frente al estrés y, en algunos casos, servir como vehículos para la liberación controlada de fertilizantes, microorganismos benéficos o pesticidas.

Si bien los hidrogeles sintéticos han demostrado gran eficacia, las preocupaciones ambientales asociadas a su baja degradabilidad han impulsado el desarrollo de alternativas basadas en polisacáridos naturales, más sostenibles y compatibles con el medio ambiente. La evidencia científica muestra resultados prometedores, aunque también subraya la importancia de ajustar cuidadosamente la composición y la dosis para evitar efectos adversos.

En un escenario marcado por el cambio climático y la creciente escasez de agua, la investigación en hidrogeles a base de polisacáridos representa una apuesta estratégica hacia una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Si se diseñan adecuadamente, pueden convertirse en herramientas clave para mejorar la productividad del maíz en condiciones adversas, optimizar el uso del agua y reducir la dependencia de insumos químicos convencionales. La pregunta ya no es si los hidrogeles pueden transformar la agricultura, sino cómo diseñarlos de manera segura, eficiente y sostenible para enfrentar los desafíos alimentarios del siglo XXI. Además, podrían convertirse en aliados clave para garantizar la seguridad alimentaria en las próximas décadas. Sin embargo, aún existen retos que afrontar para que este tipo de hidrogeles puedan obtenerse a escala industrial. Entre ellos se encuentran los altos costos de producción (debido a la extracción y purificación de las materias primas), la variabilidad en la composición de los polisacáridos obtenidos y la susceptibilidad a la contaminación, factores que continúan limitando su aplicación industrial.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CIQA por el financiamiento otorgado (proyecto 6797).

REFERENCIAS

- Chen, X., Mao, X., Lu, Q., Liao, Z., & He, Z. (2016). Characteristics and mechanisms of acrylate polymer damage to maize seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.018>
- Dorman, D. C., Foster, M. L., Olesnevich, B., Bolon, B., Castel, A., Sokolsky-Papkov, M., & Mariani, C. L. (2018). Toxicity associated with ingestion of a polyacrylic acid hydrogel dog pad. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 30(5), 708–714. <https://doi.org/10.1177/1040638718782583>
- Elbarbary, A. M., & Ghobashy, M. M. (2017). Controlled release fertilizers using superabsorbent hydrogel prepared by gamma radiation. *Radiochimica Acta*, 105, 865–876. <https://doi.org/10.1515/ract-2016-2679>
- Ghobashy, M. M., Amin, M. A., Ismail, M. A., Nowwar, A. I., El-Diehy, M. A., & Gayed, H. M. (2023). Radiation cross-linked ultra-absorbent hydrogel to rationalize irrigation water and fertilizer for maize planting in drought conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 252, 126467. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126467>
- Ibrahim, M. M., Abd-Eladl, M., & Abou-Baker, N. H. (2015). Lignocellulosic biomass for the preparation of cellulose-based hydrogel and its use for optimizing water resources in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(42), 42652. <https://doi.org/10.1002/app.42652>
- Jayanudin, Lestari, R. S. D., Barleany, D. R., Pitaloka, A. B., Yulvianti, M., Lumbantobing, P. I., & Prasetyo, Z. E. (2024). Synthesis of polyvinyl alcohol-based polymer hydrogel as water holding in sandy soil using gamma radiation technique and its application for urea loading. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100634>
- Khan, M., Qadri, W. A., & Gurav, R. K. (2020). Polysaccharide based superabsorbent polymer: A review. *Compliance Engineering Journal*, 11(9), 261–272. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3904461>
- Lima-Tenório, M. K., Karas, L. P., Furmam-Cherobim, F., Guerlinguer, E., Rubira, A. F., Steffens, M. B. R., Galvão, C. W., Tenório-Neto, E. T., & Etto, R. M. (2024). Encapsulation of plant growth-promoting bacteria with gum arabic hydrogels: A

potential system for sustainable agriculture. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(11), 5702–5712. <https://doi.org/10.1007/s10924-024-03339-w>

Lv, Q., Xiao, T., Dong, G., Tan, X., Zhang, Z., Zhao, M., Zhu, M., Li, J., & Zhang, W. (2024). Preparation and characterization of starch carbamate modified natural sodium alginate composite hydrogel blend formulation and its application for slow-release fertilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278, 134713. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134713>

Mazloom, N., Khorassani, R., Zohury, G. H., Emami, H., & Whalen, J. (2020). Lignin-based hydrogel alleviates drought stress in maize. *Environmental and Experimental Botany*, 175, 104055. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104055>

Mikhailidi, A., Ungureanu, E., Tofanica, B. M., Ungureanu, O. C., Fortună, M. E., Belosinschi, D., & Volf, I. (2024). Agriculture 4.0: Polymer hydrogels as delivery agents of active ingredients. *Gels*, 10(6), 368. <https://doi.org/10.3390/gels10060368>

Sultan, M., & Taha, G. (2024). Sustained-release nitrogen fertilizer delivery systems based on carboxymethyl cellulose-grafted polyacrylamide: Swelling and release kinetics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266, 131184. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131184>

Zhang, Y.-H., Wei, L.-Q., Liu, C.-S., Jiang, X.-Q., Wu, W.-S., Wei, S.-P., Xin, S., Sheng, X., & Zhong, Z. (2025). Facile construction of eco-friendly chitosan-based supramolecular hydrogels as pesticide delivery systems for plant growth regulation and antifungal applications. *ACS Omega*, 10, 39162–39173. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05667>