

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**POLÍMEROS EN LA ELABORACIÓN DE HIDROGELES Y SUS VENTAJAS EN
EL USO AGRÍCOLA**

POR

FRANCISCA BELÉN MARTIN DÍAZ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA.**

**CONCEPCIÓN - CHILE
2023**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**POLÍMEROS EN LA ELABORACIÓN DE HIDROGELES Y SUS VENTAJAS EN
EL USO AGRÍCOLA**

POR

FRANCISCA BELÉN MARTIN DÍAZ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA.**

**CONCEPCIÓN, CHILE
2023**

Aprobada por:

Profesora guía, María Dolores López B.
Licenciada en Química, Dr.

Guía

Profesor co-guía, Juan David Giraldo
Ingeniero Químico, Dr.
Universidad Austral de Chile

Co-Guía

Profesor Asociado, Mauricio Schoebitz
Ingeniero Agrónomo, Dr.

Asesor

Profesor Titular, Homero Urrutia
Licenciado en Biología, Dr.

Asesor

Decano, Guillermo Wells
Ingeniero Agrónomo, Mg.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

| | Página |
|--|---------------|
| RESUMEN..... | 1 |
| SUMMARY..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| DESARROLLO..... | 4 |
| Capítulo I: Polímeros sintéticos..... | 5 |
| Capítulo II: Polímeros naturales..... | 7 |
| Capítulo III: Usos y aplicaciones agrícolas..... | 15 |
| CONCLUSIONES..... | 17 |
| REFERENCIAS..... | 18 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| Figura 1 Polímeros de acrilamida. (a) Estructuras resonantes de la acrilamida y (b) copolimerización de la acrilamida con bis-acrilamida..... | 5 |
| Figura 2 Estructura de la goma xantana..... | 7 |
| Figura 3 Monómeros de quitosano..... | 8 |
| Figura 4 Estructuras químicas de la celulosa y sus derivados..... | 10 |
| Figura 5 Estructura química de alginatos con formación de “caja de huevo”..... | 12 |
| Figura 6 Adaptado de estructuras de los tipos de carragenanos más conocidos y la presencia de grupos sulfatos..... | 13 |
| Figura 7 Técnicas de encapsulación..... | 17 |

POLÍMEROS EN LA ELABORACIÓN DE HIDROGELES Y SUS VENTAJAS EN EL USO AGRÍCOLA

POLYMERS IN THE PRODUCTION OF HYDROGELS AND THEIR ADVANTAGES IN AGRICULTURAL USE

Palabras índices adicionales: demanda hídrica, poliacrilamida, biopolímeros, PLA, encapsulación.

RESUMEN

Con los años, la disponibilidad del recurso hídrico en el mundo se ha visto reducido, impactando diferentes sectores productivos. El agrícola es uno de los más afectados dado que es uno de los que mayor demanda presenta. Una alternativa para dar solución a esta problemática es el uso de hidrogeles, redes poliméricas capaces de retener grandes cantidades de agua, para aumentar la disponibilidad de este recurso en el suelo. Estos hidrogeles ya han sido utilizados con éxito en la agricultura, razón por la que en esta memoria se realizó una revisión actualizada de los distintos polímeros (sintéticos y naturales) que se utilizan en su formulación, clasificándolos según su fuente de origen, y sus diferentes aplicaciones, tales como; acondicionadores de suelos, entrega controlada de fertilizantes y formulación de bioestimulantes con previa retención de microorganismos benéficos en su red. Adicionalmente, se mencionan las diferentes técnicas de encapsulación de estos microorganismos que mejoran su calidad y respuesta en la planta.

SUMMARY

Over the years, the availability of water resources in the world has been reduced, impacting different productive sectors. Agriculture is one of the most affected since it is one of the sectors with the highest demand. An alternative to solve this problem is the use of hydrogels, polymeric networks capable of retaining large quantities of water, to increase the availability of this resource in the soil. These hydrogels have already been successfully used in agriculture, which is why in this report an updated review of the different polymers (synthetic and natural) used in their formulation was carried out, classifying them according to their source of origin, and their different applications, such as soil conditioners, controlled delivery of fertilizers and

formulation of biostimulants with prior retention of beneficial microorganisms in their network. Additionally, the different techniques of encapsulation of these microorganisms that improve their quality and response in the plant are mentioned.

INTRODUCCIÓN

Desde mediados del siglo XX se han observado fenómenos meteorológicos y climáticos preocupantes, donde los cambios en las precipitaciones y temperaturas afectan directamente en las reservas de aguas, disminuyendo la disponibilidad y extracción de este recurso (ONU-agua, 2020). A nivel mundial, la agricultura es el sector que más consume agua, extrayendo el 71,64% del agua dulce. En Chile, la agricultura extrae el 90,89% (FAO, 2020), existiendo 900.396 hectáreas bajo riego (INE, 2022), donde factores del suelo como la estructura y textura influyen en el flujo, disponibilidad y almacenamiento del agua, elementos que se ven afectados por la baja calidad de suelos degradados (Bronick & Lal, 2005; Pal *et al.*, 2020).

Teniendo en cuenta la importancia del agua en el sector agrícola, es crucial buscar y utilizar estrategias que mitiguen el estrés hídrico y aumenten la disponibilidad de agua en el suelo. De manera natural, bajo condiciones de estrés se pueden generar biopelículas alrededor de las raíces que mantienen húmedo este espacio, ya que está compuesta mayoritariamente de agua (Pandit *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha observado que la incorporación de hidrogeles al suelo aumenta su contenido de agua, disminuyendo su conductividad hidráulica y mejorando su retención hídrica (Mohawesh & Durner, 2019). Un hidrogel se entiende como una red polimérica reticulada que tiene la capacidad de hincharse y retener grandes cantidades de agua en su estructura, pero que no se disuelve en ella (Ahmed, 2015). El contenido de agua en un hidrogel puede cambiar dependiendo de su capacidad de hincharse, la que está influenciada por la temperatura, pH, fuerza iónica y otros factores externos, esto debido a la afinidad termodinámica de los materiales que componen el hidrogel con el agua, ante la presencia de grupos hidrofílicos como $-NH_2$, $-COOH$, $-OH$, $-CONH_2$ y $-SO_3H$ en su estructura química (Bahram *et al.*, 2016; Gun'ko *et al.*, 2017). Esto, junto a su amplia versatilidad y propiedades, los hacen objeto de interés investigativos, estudiándose en campos de la ingeniería, biomedicina, biotecnología, entre otros (Yahia, 2015).

Los hidrogeles se pueden clasificar según su tipo de entrecruzamiento, origen de los polímeros que lo forman, método de preparación, estructura física y carga eléctrica (Madduma & Madihally, 2021). Comúnmente, están hechos en base a polisacáridos, polipéptidos, poliacrilamida y poliamida, donde las cadenas de estos polímeros son entrecruzadas química o físicamente (Raghuwanshi & Garnier, 2019). Los hidrogeles que son resultado del entrecruzamiento químico se dan gracias a la formación enlaces covalentes, lo que les confiere la propiedad de indisolubilidad. Por otro lado, los hidrogeles físicamente entrecruzados se basan en fuerzas no covalentes, como las causadas por interacciones electrostáticas, fuerzas hidrofóbicas y enlaces de hidrógeno, que bajo ciertas condiciones del sistema puede resultar en su descomposición, por lo que no cuentan con la propiedad de indisolubilidad (Lu *et al.*, 2018). Complejos destacables producto de uniones físicas son los complejos polielectrolitos, donde ocurre una interacción iónica entre cadenas poliméricas ionizadas de cargas opuestas, como por ejemplo los formados por el alginato (-) y el quitosano (+) (Gierszewska *et al.*, 2018).

Para entender el funcionamiento de los hidrogeles agrícolas se debe conocer la interacción del agua, el polímero y el suelo. El agua dentro del hidrogel puede clasificarse en tres tipos: *agua libre*, con una estructura y movilidad similar al agua normal; *agua ligada*, agua unida a las cadenas del polímero por fuertes puentes de hidrógeno; y *agua intermedia*, que interacciona débilmente con las cadenas del polímero y las moléculas de agua adyacentes (Liu *et al.*, 2021). Respecto a la interacción del polímero y el suelo, se debe tener en cuenta cuatro criterios: (1) el polímero ocupa parte del espacio poroso del suelo, afectando su capacidad de retención de agua; (2) el polímero por sí solo puede absorber y perder agua, alterando el contenido total de agua del suelo; (3) al estar presente en los poros del suelo se comporta diferente al polímero puro, ya que no pueden expandirse libremente, absorbiendo menos agua que los puros; (4) el hinchamiento del hidrogel puede inducir una expansión del suelo, dada por factores del suelo y las propiedades del polímero (Zhou *et al.*, 2020).

En el suelo, la degradación del hidrogel ocurre luego de 6 meses, pudiendo ocurrir por la acción de rayos UV, microorganismos y/o enzimas (Malik *et al.*, 2022),

proceso que depende de diferentes factores como la temperatura, pH, humedad, crecimiento de microorganismos y el contenido de oxígeno y nutrientes del suelo (Phetwarotai *et al.*, 2013). Se ha observado que la presencia de urea en el suelo acelera la degradación de materia orgánica, provocando que la degradación de hidrogeles biodegradables sea más rápida. Otro factor es el tipo de suelo, dado que suelos agrícolas tiene una degradación más rápida que en otros suelos, debido a la baja presencia de materia orgánica, así como en suelos arenosos es rápida y en arcillosos es lenta, esto principalmente por el tamaño de sus partículas y la aireación de sus poros (Nie *et al.*, 2004; Turioni *et al.*, 2021).

Actualmente, existe una tendencia en el desarrollo de nuevos materiales, donde se sustituya de manera parcial o completa los polímeros sintéticos por polímeros naturales (Ghobashy *et al.*, 2021). Los hidrogeles no se quedan atrás y su obtención usando polímeros naturales ha permitido desarrollar materiales biodegradables y biocompatibles debido a su origen, ejemplos de estos biopolímeros son la celulosa, almidón, alginato, quitosano y gomas (Varghese *et al.*, 2020). A nivel mundial, el mercado de bioproductos ha tenido una creciente demanda, pronosticando un crecimiento anual de 13,7%, que alcanzaría los 24.600 millones de dólares en el año 2027 (Research and Markets, 2022). Es por esto que, en esta monografía, se revisarán tanto los polímeros sintéticos, mostrando sus ventajas y desventajas, así como los biopolímeros, que son tendencia actualmente como materiales más sostenibles para la síntesis de hidrogeles. Estos representan una herramienta con muchas oportunidades y beneficios en la agricultura, a través de la conservación de suelo agrícola, reducción del estrés por sequía, incremento de la eficiencia del uso de los fertilizantes y aporte de agua al suelo (Neethu *et al.*, 2018). Además, permite la aplicación de nuevas tecnologías como la encapsulación de fertilizantes y bioestimulantes (Olad *et al.*, 2018; Pour *et al.*, 2021).

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentará por capítulos los diferentes polímeros que se utilizan en la agricultura para la formulación de hidrogeles, separados en dos grandes grupos: sintéticos y naturales, donde los últimos se clasificarán según su fuente: animal, vegetal y algas. Finalmente, se presentarán sus aplicaciones en la

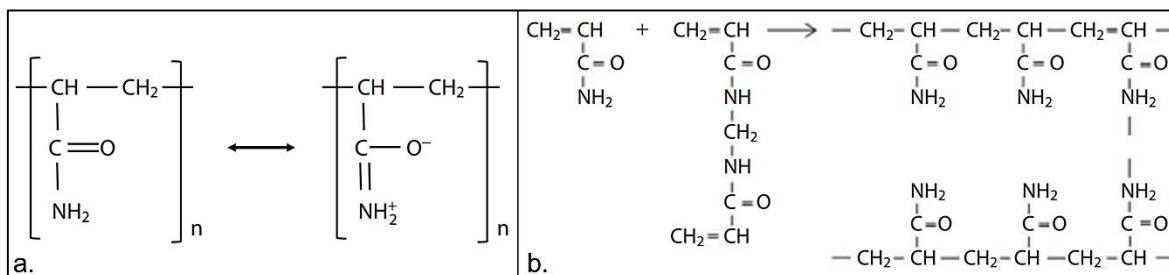
agricultura y las técnicas de producción como bioinsumos.

Capítulo I: Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son en base a el petróleo, poseen propiedades físico químicas más controlables, una mayor hidrofobicidad y resistencia mecánica que los naturales, lo que aumenta su vida útil, pero tienen baja actividad biológica. Estos se pueden sintetizar utilizando monómeros vinílicos polimerizables, entre los que podemos encontrar: poli (alcohol vinílico) (PVA), poli (etilenglicol) (PEG), poli (óxido de etileno) (PEO), poli (2-hidroxietil metacrilato) (PHEMA), poli (ácido acrílico) (PAA) y poli (acrilamida) (PAM). En la agricultura los polímeros sintéticos más utilizados son la poli(acrilamida) y poli(acrilato) (Bashir *et al.*, 2020; Behera & Mahanwar, 2020).

Las poli(acrilamidas) se utilizan hace varios años en estudios para mantener la estructura de los suelos y disminuir la erosión de estos, demostrando que controla la erosión en el riego y mejora la infiltración del agua (Lentz *et al.*, 1992). Existe una amplia variedad de PAM con diferentes densidades, pesos moleculares y estructuras químicas, ya que la acrilamida tiene la capacidad de reaccionar con otros monómeros y producir polímeros con carga, sin carga, anfóteros o zwitteriónicos. Las PAM no iónicas son más hidrofílicas que otros polímeros, ya que los grupos funcionales en su estructura química (grupo amida y carbonilo) forman estructuras resonantes (Figura 1.a), presentando una alta polaridad. Los geles de poli(acrilamida) son formados por la copolimerización de acrilamida con bis-acrilamida (Figura 1.b), donde el tamaño de los poros se pueden modificar con la concentración del monómero y las condiciones de la reacción (tipo de iniciador, temperatura y tiempo) (Whipple & Zheng, 2014; Wiśniewska, 2018).

Figura 1. Polímeros de acrilamida. (a) Estructuras resonantes de la acrilamida y (b) copolimerización de la acrilamida con bis-acrilamida.



Fuente: Modificado de Wiśniewska, 2018.

Los poliacrilatos son resinas derivadas del éster acrílico, obtenidos de la polimerización por doble enlace de carbono-carbono en su estructura (Bao *et al.*, 2015). Sus monómeros se entrecruzan con moléculas típicas como N,N'-metilenbisacrilamida (bis-acrilamida) y trialamina, pudiéndose producir hidrogeles capaces de retener más del 99% de su peso en agua si se utilizan monómeros como el ácido acrílico y el metacrílico (Kinney & Scranton, 1994).

Las PAM y los poliacrilatos se pueden entrecruzar con otros polímeros y formar hidrogeles híbridos, entregándoles características diferentes a la matriz del hidrogel, como mayor absorción de agua y resistencia mecánica. Se han explorado estas formulaciones en diferentes áreas (medicina, agricultura, limpieza de agua, entre otros), demostrando la versatilidad de estos polímeros y la facilidad de modificar sus propiedades (Li & Mooney, 2016; Sojka *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 2022).

A pesar de los beneficios que puede traer el uso de estos polímeros, la preocupación por su toxicidad ha estado presente hace años, donde Seybold (1994) destacó el hecho de que la poliacrilamida no era tóxica en seres vivos, pero su monómero, la acrilamida, es considerado un compuesto neurotóxico y cancerígeno, donde su alta solubilidad en el agua y bajo potencial de adsorción a sedimentos la convierte en un potencial contaminante de aguas subterráneas. En el suelo, la acrilamida se degrada rápidamente a CO₂, NH₄⁺ y agua, existiendo bacterias capaces de degradarla a amonio y a ácido acrílico, compuesto menos tóxico. Con los años, se ha demostrado toxicidad de la poliacrilamida en organismos acuáticos (Duggan *et al.*, 2019) y plantas (Tabra *et al.*, 2020).

Tanto la PAM como el poliacrilato se pueden encontrar en el mercado de productos agrícolas, como Terrasorb[®], hidrogel a base de poli(acrilato-co-acrilamida) (Panescu *et al.*, 2022). Respecto a sus usos, la PAM se ha utilizado para mejorar la calidad de suelos degradados y aumentar la estabilidad en taludes en conjunto con fragmentos de roca (Shengqiang & Dongli, 2018) y biochar (H. Wang *et al.*, 2019). También se utiliza como portador de fertilizantes (NPK) en conjunto con gelatina, cuyo hidrogel presenta propiedades de liberación lenta de nutrientes, teniendo una buena aplicación en la agricultura (Ghobashy *et al.*, 2018).

Si bien los polímeros sintéticos como la poliacrilamida y el poliacrilato se llevan

usando por años en la agricultura, siendo buenos retenedores de agua y mostrando buenos resultados en la entrega controlada de componentes usados en la agricultura (p. ej. Nutrientes), la incertidumbre por los residuos que quedan en el suelo y sus efectos negativos en la salud humana, hacen necesario un cambio en el uso de matrices absorbentes, optando por alternativas más amigables con el ambiente extraídas de fuentes naturales.

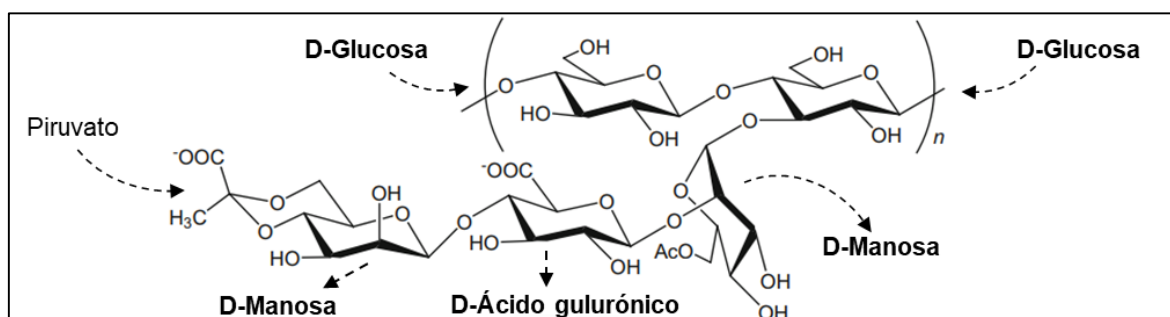
Capítulo II: Polímeros naturales

En este capítulo se expondrán polímeros naturales que se utilizan en la formación de hidrogeles, clasificados según su fuente de origen: animal, vegetal y algas, agregando otro polímero en base a residuos orgánicos, el ácido poliláctico (PLA).

Base animal

Goma xantana: La goma xantana es un exopolisacárido producido por la fermentación de diferentes tipos de bacterias del género *Xanthomonas*, donde la cepa más utilizada para su producción es la *X. campestris* (Ahmad *et al.*, 2019). Es un heteropolisacárido de alto peso molecular y de estructura central similar a la celulosa, compuesto por unidades de β -D-glucosa, β -D-manosa, α -D-manosa y D-ácido glucurónico, donde la manosa terminal de la cadena puede ser sustituida por ácido pirúvico (Figura 2). La presencia de ácido glucurónico y ácido pirúvico en la goma xantana la convierte en un polielectrolito (Berninger *et al.*, 2021), por lo que sus propiedades en solución acuosa están relacionadas con su estructura química.

Figura 2. Estructura de la goma xantana.



Fuente: Adaptado de Endo *et al.*, 2015 y Petri, 2015.

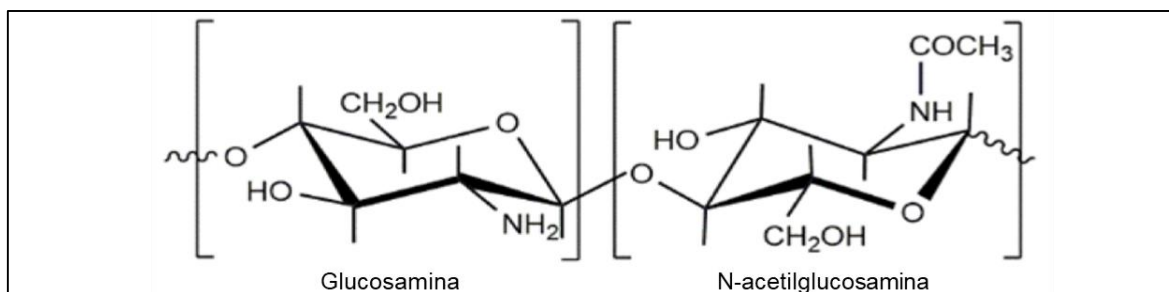
La goma xantana se utiliza en formulaciones cuando se quiere lograr características espesantes, estabilizadoras y emulsionantes. En la agricultura, se

ha utilizado en hidrogeles para su uso en suelos, obteniendo una matriz biodegradable, con propiedades antibacteriales y con la capacidad de liberar de manera prolongada agroquímicos como la urea (Chaudhary *et al.*, 2017). Otro ejemplo, es como un superabsorbente con capacidad de absorción de un 1000%, aumentando el contenido de agua en suelos, reduciendo su evaporación y favoreciendo el crecimiento en plantas (Sorze *et al.*, 2023).

Quitina y Quitosano: La quitina es un homopolímero formado por (1,4)-2-acetamido-2-deoxy- β -D-glucosa (Muzzarelli, 1983), siendo el segundo biopolímero más abundante después de la celulosa. Es encontrado como el mayor componente de la pared de los hongos, del exoesqueleto de los artrópodos, tendones y revestimiento de sus sistemas. Actualmente, las mayores fuentes comerciales de la quitina son el cascarón de cangrejos y camarones, siendo uno de los subproductos que se reciclan y que conduce a la sostenibilidad del medio ambiente (Bakshi *et al.*, 2020). En la estructura de los exoesqueletos cumple el papel de rigidez del tejido, ya que cuando la quitina se combina con proteínas ocurre cristalización del compuesto y con esto forma una estructura fibrosa estable. En la cáscara de los crustáceos la concentración de quitina varía de un 6% a un 72% dependiendo de la especie, biomasa de la fuente y el análisis utilizado (Abere *et al.*, 2022).

El quitosano se obtiene de la deacetilación de la quitina, proceso que puede ocurrir de manera química o biológica. Para su obtención química se utilizan tratamientos ácidos y alcalinos, siendo la más común a escala industrial. Por otro lado, en la biológica, participan microorganismos y enzimas, pero la alta cristalinidad de la quitina es la principal limitante en su uso. El quitosano obtenido es un copolímero con una distribución aleatoria de N-acetilglucosamina y glucosamina (Figura 3), cuya distribución en la cadena, peso molecular y proporción molar de estos confieren propiedades únicas al polímero (Gierszewska *et al.*, 2018; Ojeda *et al.*, 2020). El quitosano es estable en términos de compatibilidad, degradabilidad y no toxicidad, siendo adecuado para tecnologías de liberación de fármacos, donde es más demandado en la industria por formar hidrogeles esféricos (Pirsa *et al.*, 2022).

Figura 3. Monómeros de quitosano.



Fuente: Extraída de Quiñones *et al.*, 2018.

En la agricultura, el interés por los hidrogeles a base de quitosano ha aumentado, debido a su bajo costo y su riqueza en grupos aminos e hidroxilos, siendo utilizados en la entrega de macro y micronutrientes, pesticidas y herbicidas, así como el tratamiento de aguas residuales al remover metales, tinturas, fenoles, pesticidas y fungicidas por absorción (Qu & Luo, 2020). Un ejemplo de esto es un hidrogel de quitosano entrecruzado con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), el cual funciona como acondicionador de suelo, aumentando su humedad, lo que repercute en un mayor rendimiento en las plantas, ya que provoca un incremento en su número de hojas, contenido de carbono orgánico y potasio (Ritonga *et al.*, 2019).

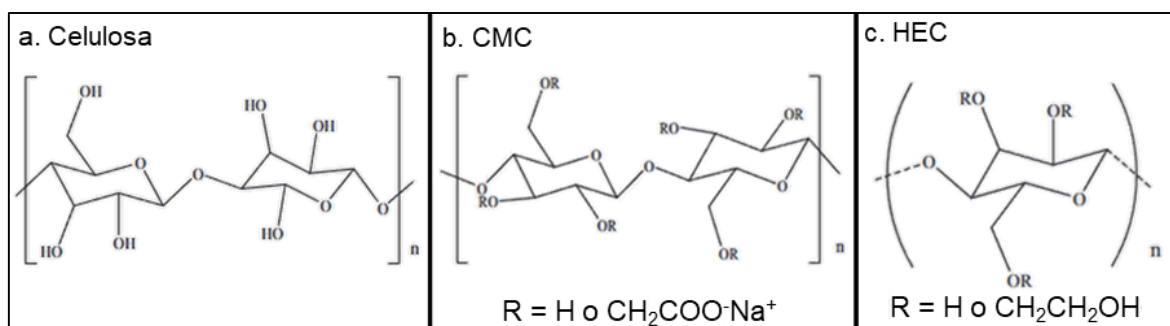
Base Vegetal

Celulosa: La celulosa es el polisacárido más abundante en la naturaleza, encontrándose en árboles, plantas, frutas, bio-residuos y algas, además de ser sintetizada por algunas bacterias. Es un polímero biocompatible, biodegradable, renovable, de buena resistencia mecánica y amigable con el medio ambiente, que requiere varios pasos de purificación para reducir sus contaminantes (lignina y pectina). Aun así, su gran disponibilidad y bajo costo la convierten en una buena opción para la producción a escala industrial de materiales a base de celulosa, incluidos los hidrogeles. Su estructura está conformada por una cadena lineal de unidades de $\beta(1-4)$ D-glucosa (*Figura 4.a*), que presentan un gran número de fuerzas de *Van der Waals* y enlaces de hidrógeno entre los grupos hidroxilos, haciéndola insoluble en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos, que repercute en una baja reactividad (Demitri *et al.*, 2019; Zainal *et al.*, 2021).

La carboximetilcelulosa (CMC) es un derivado de la celulosa con grupos carboxilatos en su estructura (*Figura 4b*). Es un polisacárido aniónico soluble en agua y ampliamente utilizado como coloide hidrofílico (Kunjalukkal *et al.*, 2023),

ideal para preparar hidrogeles por su alta capacidad de hincharse. La CMC sódica (CMCNa) es la más utilizada por su alta absorción y fuerza iónica (Durpekova *et al.*, 2020), pero cuando se utiliza sola, forma hidrogeles con poca resistencia mecánica debido a la repulsión entre sus moléculas cargadas. Es por esto que se ha utilizado otro derivado de la celulosa, la hidroxietilcelulosa (HEC) (Figura 4.c), combinada con CMC para mejorar el entrecruzamiento intermolecular (Mali *et al.*, 2018).

Figura 4. Estructuras químicas de la celulosa y sus derivados.



Fuente: Extraído de Zainal *et al.*, 2021.

En la agricultura, se ha utilizado en la formulación de un hidrogel nanocompuesto con partículas de sílice, capaz de aumentar el contenido de agua en el suelo y liberar de manera controlada fertilizantes de nitrógeno, fósforo y potasio, reduciendo los costos de producción (Olad *et al.*, 2018). También, se ha utilizado en la encapsulación de esporas de *Trichoderma harzianum* como agente de biocontrol y bioestimulante, favoreciendo el crecimiento de los microorganismos encapsulados luego de estar almacenados por 10 días (Brondi *et al.*, 2022)

Almidón: El almidón es un homopolisacárido compuesto de amilosa lineal y amilopectina ramificada, siendo uno de los principales componentes de reserva en las plantas. La amilosa está constituida por glucosas unidas por enlaces glicosídicos α -(1,4) y la amilopectina formada por uniones α -(1,4) y α -(1,6), donde su presencia en la cadena del almidón va a depender de la fuente o planta de la que se extraiga, siendo las más importantes en las industrias el trigo, arroz, mandioca, maíz y papa. Las propiedades del almidón van a depender de su composición, ya que la amilosa proporciona elasticidad al material, mientras que la amilopectina entrega resistencia y elongación (Agarwal *et al.*, 2021; El-Aziz *et al.*, 2022).

El almidón contiene una gran cantidad de grupos OH en su estructura, donde la reactividad de este polímero depende de estos grupos químicos, permitiéndole oxidarse, reducirse y formar enlaces de distinto tipo. El uso de este polímero tiene ventajas y desventajas. Las ventajas son que es biocompatible, no tóxico, barato, de buenas propiedades mecánicas y fácilmente disponible. Por otro lado, las desventajas son que presenta problemas por su baja estabilidad y procesamiento de los productos finales. Es por esto, que se ha utilizado la alternativa de modificarlos para lograr tener mejores características, utilizando métodos de entrecruzamiento físicos, poco estables, y químicos (Qamruzzaman *et al.*, 2022). En los métodos químicos se introducen grupos iónicos o hidrofóbicos que cambian la viscosidad del polímero, ocurriendo una eterificación, donde grupos hidroxilos son sustituidos por grupos éter (ej. el carboximetilalmidón sódico (CMS-Na)), o una injertación de otros polímeros, como acrilamida y ácido acrílico. Sin embargo, el último no parece ser muy utilizado, ya que se ha prestado más atención a la disminución en el uso de polímero sintéticos por los problemas ambientales y de salud (Ismail *et al.*, 2013). Además, la combinación con otros polímeros naturales mejora las características de la matriz, haciéndose tendencia la mezcla con quitosano, gelatina, gomas, alginato y celulosa (Suriyatem *et al.*, 2019).

Sus aplicaciones en la agricultura se han visto de manera individual o entrecruzado con otros polímeros, utilizando almidón de maíz para la encapsulación de urea (Ibrahim *et al.*, 2019) y de micronutrientes (Fe, Cu y Mn) (Chiaregato & Faez, 2021) para disminuir las pérdidas, mejorando su eficiencia de entrega y controlando la contaminación, así como su interacción con alginato en la encapsulación de microorganismos benéficos como *Metarhizium brunneum* (Krell *et al.*, 2018) y *Pseudomonas protegens* SN15-2 (X. Wang *et al.*, 2021).

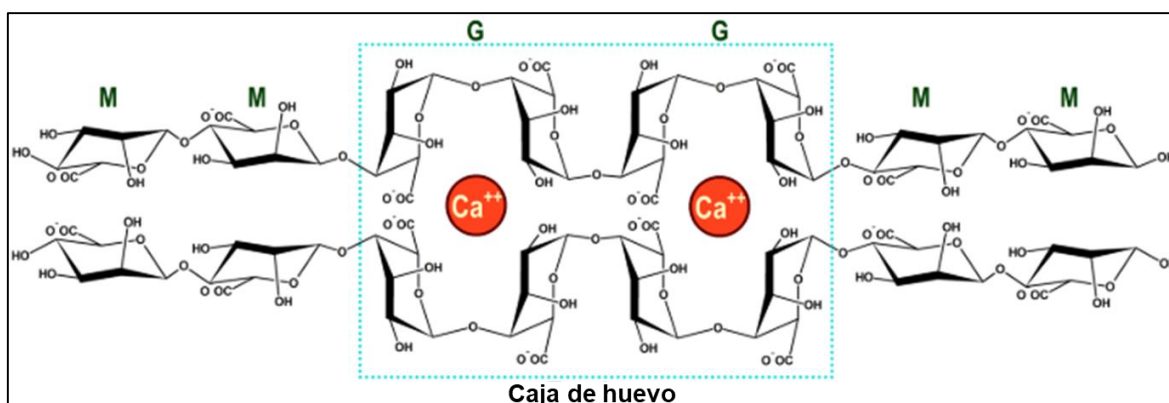
Base algas

Ácido algínico: Es un biopolímero obtenido de algas pardas de la clase *Phaeophyceae* y algas rojas de la familia *Corallinaceae*, además de ser producidos por bacterias del suelo de los géneros *Pseudomonas* y *Azotobacter* (Belik *et al.*, 2018), cuyo uso en humanos está autorizado, siendo aplicado en muchas industrias como su sal sódica el alginato: farmacéutica, química, textil, alimentaria, entre otras,

por sus propiedades de compatibilidad con otros compuestos (Hurtado *et al.*, 2020).

La estructura del alginato se compone de subunidades de (1 – 4) ácido β -D-manurónico (M) y ácido α -L-gulurónico (G), cuya secuencia de bloques M y G varía según la fuente y las condiciones de crecimiento del organismo productor, determinando sus propiedades reológicas. Las propiedades gelificantes del alginato están relacionadas con la interacción de los bloques GG con cationes divalentes, principalmente el Ca^{2+} , uniéndose y formando una red conocida como “caja de huevo”, capaz de formar la matriz de los geles (Figura 5). La frecuencia de subunidades G determina la fuerza del gel, ya que en presencia de calcio forma geles más fuertes y viscosos, mientras que sin calcio y poca secuencia de bloques G son flexibles y menos viscosos (Rhein *et al.*, 2017; Urtuvia *et al.*, 2017).

Figura 5. Estructura química de alginatos con formación de “caja de huevo”.



Fuente: Extraído de Lee *et al.*, 2019.

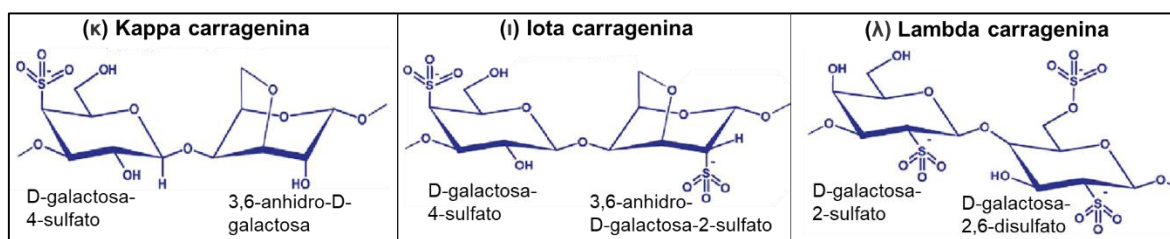
Entre las propiedades de los alginatos, aparte de ser hidrocoloides, son además espesantes, gelificantes, emulsionantes, estabilizantes y funcionan como agentes de control de recubrimiento, encapsulación e inhibidores de sinéresis (Kaya, 2020; Verhelst, 2021). Debido a estas propiedades, su uso en la industria alimentaria es bien conocida. Entre los distintos tipos de alginatos se da lugar a diversos usos: regeneración de tejidos, apósitos, aplicaciones en biomedicina y en sistemas de liberación controlada de fármacos (Parveen *et al.*, 2019; Sahoo & Biswal, 2021).

En agricultura, cabe destacar a los alginatos como intercambiadores catiónicos, por lo que además de retener grandes cantidades de agua y proteger compuestos de interés también liberaran al suelo ciertos nutrientes que podrían ser usados por

la planta. Los alginatos son solubles en agua (Niculescu & Grumezescu, 2022), por lo que tanto sus encapsulados como los componentes y minerales de la matriz pueden quedar disponibles para el ambiente. Se han utilizado en la encapsulación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), microencapsulando diferentes cepas de *Bacillus*, donde las microesferas en el suelo pueden funcionar como pequeños biorreactores capaces de aumentar la concentración inicial de células bacterianas, mostrando efectos positivos en plantas de trigo (Rojas *et al.*, 2022), así como en la formación de cápsulas de alginato de sodio y celulosa con alfalfa inmovilizada como material de entrega controlada de Cu^{+2} en suelos, pudiendo ser utilizado en la industria de los fertilizantes como reemplazo de los fertilizantes químicos (Skrzypczak *et al.*, 2019).

Carragenanos: En cuanto a la carragenina, cumple un papel importante como estabilizador, espesante y gelificante, utilizado en la industria alimentaria, médica, y textil, extraído de las algas rojas de la clase *Rhodophyceae* (Fathiraja *et al.*, 2021; Kaya, 2020). Estructuralmente, están compuestas por unidades repetidas de galactosa y 3,6-anhidrogalactosa, sulfatadas y/o no sulfatadas. Sus propiedades están dadas por el número y posición de los grupos éster sulfato, donde niveles más altos dan lugar a una temperatura de solubilidad más baja y producción de geles menos resistentes o, incluso, inhibición de la gelificación. De los diferentes tipos de carrageninas se destacan la kappa, iota y lambda carragenina, donde la primera forma geles fuertes, la segunda forma geles suaves y la tercera no forma geles (Figura 6) (Machado *et al.*, 2019).

Figura 6. Adaptado de estructuras de los tipos de carragenanos más conocidos y la presencia de grupos sulfatos.



Fuente: Extraído y modificado de Sankalia *et al.*, 2006.

Se ha utilizado a la carragenina como elicitador en diferentes plantas para mejorar

la producción del cultivo, pudiendo funcionar como biofertilizante y mejorador de las defensas de la planta ante patógenos. Se ha demostrado que la lamda carragenina por su alto grado de sulfatación induce una alta actividad elicitora en banano por las vías de aumento de fijación de carbono, biosíntesis protéica, entrega de nutrientes, entre otras (Thye *et al.*, 2022). También se ha utilizado en la entrega controlada de micronutrientes, entrecruzado con NaCMC, aumentando el contenido de agua en el suelo y el crecimiento en plantas de trigo (Akalin & Pulat, 2020).

Otros

Ácido poliláctico: El ácido poliláctico (PLA) es un termoplástico renovable y un poliéster alifático hecho de ácido láctico, componente clave en la producción de productos biodegradables, siendo uno de los biopolímeros más prometedores en el mundo. Es un polímero biodegradable, compostable, amigable con el medio ambiente y reciclable, ya que es hecho en base de fuentes renovables como son la caña de azúcar, maíz, papa, mandioca, trigo y arroz (Ilyas *et al.*, 2022).

La materia prima del PLA es un monómero de alta pureza, la lactida, que se forma a partir del ácido láctico, compuestos altamente soluble en agua y biológicamente estable. Este monómero presenta dos estructuras isómericas: L-láctico y D-láctico, de los que se pueden obtener tres formas estereoquímicas de lactida: LL-lactida (LLA), DD-lactida (DLA) y DL-lactida (meso-lactida (MLA)). De estos monómeros se obtienen sus polímeros: poli-L-lactida (PLLA), poli-D-lactida (PDLA) y poli-DL-lactida (PDLLA), los cuales tienen distintos grados de cristalinidad, afectando su velocidad de degradación, factor que puede modificarse por injertación de otros polímeros, como el polietilenglicol (PEG) (Naser *et al.*, 2021; Tyler *et al.*, 2016).

Las desventajas de este material son que es poco flexible, con una tasa de degradación lenta, hidrofobicidad, baja afinidad celular y químicamente inerte (Casalini *et al.*, 2019). Sin embargo, se ha demostrado que es un buen estabilizante de matrices de hidrogeles, donde un hidrogel formulado a base de suero, NaCMC y HEC al incorporar PLA en la matriz mejoró las propiedades mecánicas del hidrogel, su estabilidad en el suelo y eficiencia de atrapamiento de fertilizantes (Durpekova *et al.*, 2022). En la industria alimentaria se ha hecho conocido en la elaboración de materiales antibacteriales para envases con PLA relleno con nanopartículas de

TiO₂, que permite la disminución de exopolisacáridos, alterando el tamaño de las bacterias (González *et al.*, 2018), dando lugar a una mejor calidad de las uvas empaquetadas, aumentando la vida útil de la fruta hasta doce semanas bajo condiciones de calor (Batool *et al.*, 2022).

Con la creciente tendencia en el uso de biopolímeros en la agricultura es importante conocer sus características y aplicaciones para hacer uso de una herramienta versátil que puede aplicarse en nuevas áreas como una alternativa más sostenible y que puede abaratar costos.

Capítulo III: Usos y aplicaciones agrícolas

Los distintos polímeros descritos anteriormente tienen múltiples usos en la agricultura, que van desde mejoramiento de suelos hasta encapsulación para la entrega de compuestos a la planta. Su versatilidad los hace candidatos adecuados como encapsulantes en la agricultura, utilizando diferentes matrices con el fin de proteger variados componentes.

Los usos más convincentes de los hidrogeles en la agricultura son como reservorios de agua, en recubrimiento de semillas y en la inmovilización de componentes (Kaur *et al.*, 2023). En la entrega de agua, se ha visto que la capacidad de retención de agua del suelo puede aumentar cerca de un 15,5% adicionando un 10% del hidrogel al suelo, reduciendo a la vez la pérdida de humedad (Garduque *et al.*, 2020). Esto es de gran ayuda en inducción de tolerancia en las plantas ante estrés hídrico, ya que en plantas de maíz se pudo observar que en presencia del hidrogel estas tuvieron mayor contenido de biomasa y fósforo (Mazloom *et al.*, 2020). La germinación de las semillas es un punto crítico, por lo que el recubrimiento de estas con hidrogeles ha podido mejorar las condiciones de este proceso, donde en semillas de maíz recubiertas con hidrogel de almidón se mejoró su emergencia, asegurando la entrega de agua a la semilla (Pathak & Ambrose, 2020). También se han desarrollado coberturas dobles, donde la primera se inocula con bacterias fijadoras de nitrógeno y la segunda al estar compuesta de polisacáridos sirven de fuente de carbono a las bacterias y como depósito de agua para la semilla, mejorando la tolerancia al estrés hídrico de semillas de frijol (Zvinavashe *et al.*, 2021). La entrega controlada de nutrientes se ha hecho conocida por el aumento de

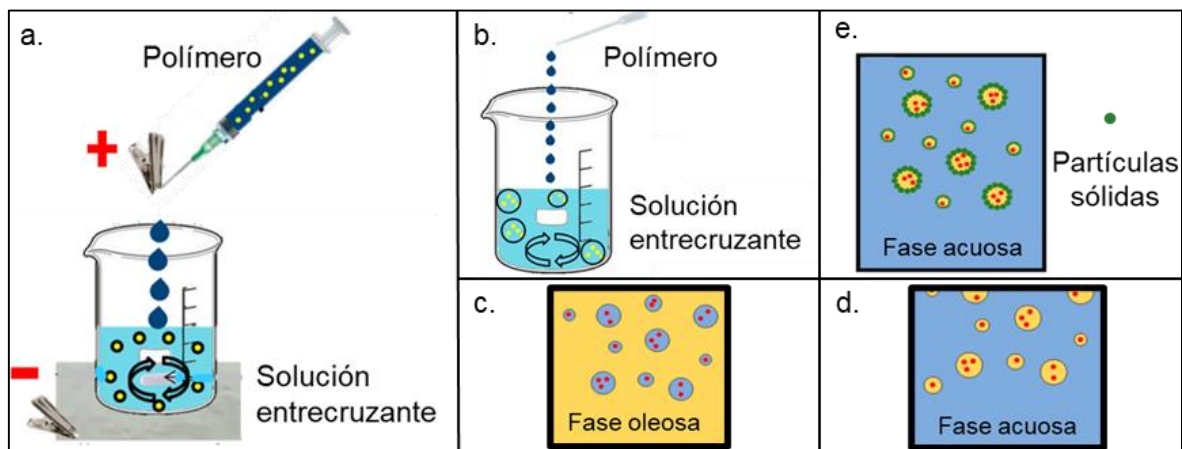
la disponibilidad de estos y la disminución de las pérdidas de fertilizante, donde se han hecho varios estudios utilizando hidrogeles en la formulación de fertilizantes con entrega controlada de nutrientes, preparación de un fertilizante de urea de liberación lenta encapsulado en membrana de almidón, ácido acrílico y acrilamida (Guo *et al.*, 2005) e hidrogel de carragenina para la entrega de iones NO_3^- , PO_4^{3-} y NH_4^+ , disminuyendo el impacto ambiental por el uso excesivo de fertilizantes (Rozo *et al.*, 2019). También se ha hecho para las aplicaciones en pesticidas con el uso de un hidrogel de almidón con quitosano para la liberación controlada del herbicida atrazina (Supare & Mahanwar, 2022).

Un bioestimulante se define como un producto que estimula la nutrición de la planta independiente de su contenido de nutrientes, pudiendo mejorar la eficiencia de uso de nutrientes, tolerancia a estrés y/o disponibilidad de nutrientes (Reglamento de la UE, 2019). Existen microorganismos benéficos que por diferentes mecanismos favorecen a las plantas, mercado de productos que posee un crecimiento anual del 15% en la industria agroalimentaria mundial (Tabassum *et al.*, 2017). La encapsulación de estos microorganismos ha mostrado efectos positivos en las plantas, por ejemplo, *Bacillus pumilus* encapsulado en alginato de sodio, aliviando efectos adversos de sequía y salinidad en las plantas (Zheng *et al.*, 2022). También, la encapsulación de la bacteria *Azospirillum brasilense* AbV5/6 en perlas de almidón y quitosano con el potencial de promover el crecimiento de plantas de maíz (Lima *et al.*, 2023) y encapsulaciones en carragenina de la bacteria *Streptomyces fulvissimus* Uts22 para el biocontrol de *Gaeumannomyces graminis* en trigo, obteniendo un control de 75-90% del patógeno (Saber & Moradi, 2021).

La encapsulación tiene el objetivo de inmovilizar, proteger, estabilizar y liberar de manera controlada su contenido (Bhatia, 2020). Existen diferentes métodos de encapsulación (spray drying, spray chilling, extrusión, coacervación, dropping, etc) (El-Kader & Abu, 2020), pero los más utilizados son la técnica de electropulverización, gelificación ionotrópica y emulsión (Jiménez *et al.*, 2023). El electropulverización consiste en la pulverización de una solución de polímero ante la aplicación de un campo magnético que forma gotas cargadas, donde el polímero está en una jeringa con punta metálica cargada positivamente. Cuando las fuerzas

electrostáticas superan la tensión superficial de la solución, se forman gotas que se repelen entre sí, cayendo a la solución entrecruzante que le entrega electrones (Figura 7.a.) (Lemr & Borovcová, 2020).

Figura 7. Técnicas de encapsulación.



Fuente: Modificado de Jiménez *et al.*, 2023.

La gelificación ionotrópica produce partículas por la interacción electrostática entre dos especies iónicas, donde el polímero por medio de un goteo cae en una solución con carga opuesta acuosa, formándose esferas, siendo una técnica más barata y rápida que la anterior (Figura 7.b.) (Pedroso & Fleitas, 2020). Por último, la emulsión es la mezcla de dos líquidos inmiscibles, existiendo las emulsiones de “aceite en agua” (Figura 7.c.), donde la fase oleosa se gotea sobre la acuosa, “agua en aceite” (Figura 7.d.), donde un líquido acuoso se gotea en una fase oleosa, y la múltiple, donde pequeñas gotas están dentro de gotas grandes, suspendidas en fases continuas, por ejemplo, “aceite en agua y aceite” (Goodarzi & Zendeboudi, 2019). Se suelen utilizar tensioactivos para estabilizar las emulsiones, impidiendo la coalescencia de las partículas, pero las emulsiones de Pickering (Figura 7.e.) se han hecho conocidas, ya que poseen una mayor estabilidad por la presencia de partículas sólidas que se ensamblan en alguna fase (Tang *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

Como se pudo ver en la revisión bibliográfica;

1.) Los hidrogeles son herramientas muy utilizadas en la agricultura, donde su aplicación como respuesta a las necesidades hídricas actuales y a la posibilidad de

aplicar nuevas tecnologías los convierten en una buena alternativa ante las problemáticas actuales respecto al clima y contaminación por residuos.

2.) Los hidrogeles son herramientas con gran impacto en la agricultura actual, donde más allá de su capacidad de retener agua, se les puede adicionar un factor extra, convirtiéndose en una herramienta multifuncional con la encapsulación de fertilizantes y bioestimulantes. Esto abre posibilidades a nuevas investigaciones que busquen la aplicación de tecnologías de vanguardia que contribuyan a mejorar las falencias que puede haber en las formulaciones o en los polímeros.

3.) Los polímeros naturales son una buena alternativa a los sintéticos, ya que sus características de biocompatibilidad, biodegradabilidad y sostenibilidad pueden ir sobre los beneficios de las matrices sintéticas que pueden traer efectos negativos al ambiente y a la salud humana y animal.

4.) A pesar de los beneficios que puede traer la aplicación de los hidrogeles agrícolas, aún falta ampliar su uso y estudiar todos los tipos de efectos que pueden traer al ambiente, ya que, si bien son una buena alternativa para aumentar la disponibilidad hídrica, no se debe dejar de lado que son aplicaciones externas al medio y que se obtienen de recursos limitados.

REFERENCIAS

1. Abere, D., Ojo, S., Paredes, M., & Hakami, A. (2022). Derivation of composites of chitosan-nanoparticles from crustaceans source for nanomedicine: A mini review. *Biomedical Engineering Advances*, 4(100058). <https://doi.org/10.1016/j.bea.2022.100058>
2. Agarwal, S., Singhal, S., Godiya, C., & Kumar, S. (2021). Prospects and applications of starch based biopolymers. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1963717>
3. Ahmad, S., Ahmad, M., Manzoor, K., Purwar, R., & Ikram, S. (2019). A review on latest innovations in natural gums based hydrogels: Preparations & applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 870–890. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.113>
4. Ahmed, E. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
5. Akalin, G., & Pulat, M. (2020). Controlled release behavior of zinc-loaded

carboxymethyl cellulose and carrageenan hydrogels and their effects on wheatgrass growth. *Journal of Polymer Research*, 27(6). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1950-y>

6. Bahram, M., Mohseni, N., & Moghtader, M. (2016). An introduction to hydrogels and some recent applications. En S. Biswas (Ed.), *Emerging Concepts in Analysis and Applications of Hydrogels* (p. 9). InTech. <https://doi.org/10.5772/64301>
7. Bakshi, P., Selvakumar, D., Kadirvelu, K., & Kumar, N. (2020). Chitosan as an environment friendly biomaterial – a review on recent modifications and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1072–1083. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.113>
8. Bao, Y., Ma, J., Zhang, X., & Shi, C. (2015). Recent advances in the modification of polyacrylate latexes. *Journal of Materials Science*, 50(21), 6839–6863. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9311-7>
9. Bashir, S., Hina, M., Iqbal, J., Rajpar, A., Mujtaba, M., Alghamdi, N., Wageh, S., Ramesh, K., & Ramesh, S. (2020). Fundamental concepts of hydrogels: Synthesis, properties and their applications. *Polymers*, 12(11), 2702. <https://doi.org/10.3390/polym12112702>
10. Batool, M., Abid, A., Khurshid, S., Bashir, T., Ismail, M., Razaq, M., & Jamil, M. (2022). Quality control of nano-food packing material for grapes (*Vitis vinifera*) based on ZnO and polylactic acid (PLA) biofilm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(1), 319–331. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05361-9>
11. Behera, S., & Mahanwar, P. (2020). Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(4), 341–356. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1647239>
12. Belik, A., Silchenko, A., Kusaykin, M., Zvyagintseva, T., & Ermakova, S. (2018). Alginate lyases: Substrates, structure, properties and prospects of application. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 44(4), 386–396. <https://doi.org/10.1134/S1068162018040040>
13. Berninger, T., Dietz, N., & González, Ó. (2021). Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. *Microbial Biotechnology*, 14(5), 1881–1896. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>
14. Bhatia, M. (2020). A review on application of encapsulation in agricultural processes. En S. Sonawane, B. Bhanvase, & M. Sivakumar (Eds.), *Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System* (pp. 131–140). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819363-1.00008-9>
15. Brondi, M., Florencio, C., Mattoso, L., Ribeiro, C., & Farinas, C. (2022). Encapsulation of *Trichoderma harzianum* with

- nanocellulose/carboxymethyl cellulose nanocomposite. *Carbohydrate Polymers*, 295(119876), 119876. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119876>
16. Bronick, C., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
17. Casalini, T., Rossi, F., Castrovinci, A., & Perale, G. (2019). A perspective on polylactic acid-Based polymers use for nanoparticles synthesis and applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7(259). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00259>
18. Chaudhary, S., Kaith, B., Jindal, R., Kumari, M., & Kaur, M. (2017). Biodegradable-stimuli sensitive xanthan gum based hydrogel: Evaluation of antibacterial activity and controlled agro-chemical release. *Reactive and Functional Polymers*, 120, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2017.08.012>
19. Chiaregato, C., & Faez, R. (2021). Micronutrients encapsulation by starch as an enhanced efficiency fertilizer. *Carbohydrate Polymers*, 271(118419), 118419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118419>
20. Demitri, C., Madaghiele, M., Grazia, M., Sannino, A., & Ambrosio, L. (2019). Investigating the structure-related properties of cellulose-based superabsorbent hydrogels. In L. Popa, M. V. Ghica, & C. Dinu (Eds.), *Hydrogels - Smart Materials for Biomedical Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80986>
21. Duggan, K., Morris, M., Bhatia, S., Khachan, M., & Lewis, K. (2019). Effects of cationic polyacrylamide and cationic starch on aquatic life. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 23(4), 04019022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000467)
22. Durpekova, S., Bergerova, E., Hanusova, D., Dusankova, M., & Sedlarik, V. (2022). Eco-friendly whey/polysaccharide-based hydrogel with poly(lactic acid) for improvement of agricultural soil quality and plant growth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.053>
23. Durpekova, S., Filatova, K., Cisar, J., Ronzova, A., Kutalkova, E., & Sedlarik, V. (2020). A novel hydrogel based on renewable materials for agricultural application. *International Journal of Polymer Science*, 2020, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/8363418>
24. El-Aziz, G., Ibrahim, A., & Fahmy, A. (2022). Using environmentally friendly hydrogels to alleviate the negative impact of drought on plant. *Open Journal of Applied Sciences*, 12, 111–133. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.121009>

25. El-Kader, A., & Abu, H. (2020). Encapsulation techniques of food bioproduct. *Egyptian Journal of Chemistry*, 63(5), 1881–1909. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.16269.1993>
26. Endo, R., Setoyama, M., Yamamoto, K., & Kadokawa, J. (2015). Acetylation of xanthan Gum in ionic liquid. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(2), 199–205. <https://doi.org/10.1007/s10924-014-0701-8>
27. FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2020). *Libro de trabajo: AQUASTAT*. https://tableau.apps.fao.org/views/AQUASTATDashboard/region_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y
28. Fathiraja, P., Gopalrajan, S., Karunanithi, M., Nagarajan, M., Obaiah, M., Durairaj, S., & Neethirajan, N. (2021). Response surface methodology model to optimize concentration of agar, alginate and carrageenan for the improved properties of biopolymer film. *Polymer Bulletin*, 1–27. <https://doi.org/10.1007/S00289-021-03797-5>
29. Garduque, R., Gococo, B., Yu, C., Nalzaró, P., & Tumolva, T. (2020). Synthesis and characterization of sodium carboxymethyl cellulose/sodium alginate/hydroxypropyl cellulose hydrogel for agricultural water storage and controlled nutrient release. *Solid State Phenomena*, 304, 51–57. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.304.51>
30. Ghobashy, M., El-Damhougy, B., Nady, N., El-Wahab, H., Naser, A., & Abdelhai, F. (2018). Radiation crosslinking of modifying super absorbent (polyacrylamide/gelatin) hydrogel as fertilizers carrier and soil conditioner. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(9), 3981–3994. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1273-9>
31. Ghobashy, M., Elbarbary, A., & Hegazy, D. (2021). Gamma radiation synthesis of a novel amphiphilic terpolymer hydrogel pH-responsive based chitosan for colon cancer drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 263(117975). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117975>
32. Gierszewska, M., Ostrowska, J., & Chrzanowska, E. (2018). pH-responsive chitosan/alginate polyelectrolyte complex membranes reinforced by tripolyphosphate. *European Polymer Journal*, 101, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.02.031>
33. González, E., Olmos, D., Lorente, M., Vélaz, I., & González, J. (2018). Preparation and characterization of polymer composite materials based on PLA/TiO₂ for antibacterial packaging. *Polymers*, 10(12), 1365. <https://doi.org/10.3390/polym10121365>
34. Goodarzi, F., & Zendejboudi, S. (2019). A comprehensive review on emulsions and emulsion stability in chemical and energy industries. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(1), 281–309. <https://doi.org/10.1002/cjce.23336>

35. Gun'ko, V., Savina, I., & Mikhalovsky, S. (2017). Properties of water bound in hydrogels. *Gels*, 3(4), 37. <https://doi.org/10.3390/gels3040037>
36. Guo, M., Liu, M., Zhan, F., & Wu, L. (2005). Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(12), 4206–4211. <https://doi.org/10.1021/ie0489406>
37. Hurtado, A., Selgas, R., & Serrano, Á. (2020, marzo). El alginato y sus inmensas aplicaciones industriales. *Nereis. Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelación y Simulación*, 12, 137–149. https://doi.org/10.46583/nereis_2020.12.573
38. Ibrahim, K., Naz, M., Shukrullah, S., Sulaiman, S., Ghaffar, A., & AbdEl, N. (2019). Controlling nitrogen pollution via encapsulation of urea fertilizer in cross-linked corn starch. *BioResources*, 14(4), 7775–7789. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.7775-7789>
39. Ilyas, R., Zuhri, M., Aisyah, H., Asyraf, M., Hassan, S., Zainudin, E., Sapuan, S., Sharma, S., Bangar, S., Jumaidin, R., Nawab, Y., Faudzi, A., Abral, H., Asrofi, M., Syafri, E., & Sari, N. (2022). Natural fiber-reinforced polylactic acid, polylactic acid blends and their composites for advanced applications. *Polymers*, 14(1), 202. <https://doi.org/10.3390/polym14010202>
40. INE Instituto Nacional de Estadística. (2022, octubre). *Censo Agropecuario*. <https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario>
41. Ismail, H., Irani, M., & Ahmad, Z. (2013). Starch-based hydrogels: present status and applications. *International Journal of Polymeric Materials*, 62(7), 411–420. <https://doi.org/10.1080/00914037.2012.719141>
42. Jiménez, D., Morales, S., Silva, P., Carrêlo, H., Gonçalves, A., Ganança, J., Nunes, N., Gouveia, C., Alves, S., Borges, J., & Pinheiro, M. (2023). Encapsulation with natural polymers to improve the properties of biostimulants in agriculture. *Plants*, 12(1), 55. <https://doi.org/10.3390/plants12010055>
43. Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, F., Williams, R., & Bohidar, H. (2023). Hydrogels in agriculture: Prospects and challenges. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(9), 3701–3718. <https://doi.org/10.1007/S10924-023-02859-1>
44. Kaya, A. (2020). Karakteristik produk gel kombinasi karaginan dan pati sagu. *Majalah BIAM*, 16(2), 79–85.
45. Kinney, A., & Scranton, A. (1994). Formation and structure of cross-linked polyacrylates. En F. Buchholz & N. Peppas (Eds.), *Superabsorbent Polymers* (Vol. 573, pp. 2–26). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0573.ch001>

46. Krell, V., Jakobs, D., Vidal, S., & Patel, A. (2018). Encapsulation of *Metarhizium brunneum* enhances endophytism in tomato plants. *Biological Control*, 116, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2017.05.004>
47. Kunjalukkal, S., Lamanna, L., Friuli, M., Sannino, A., Demitri, C., & Licciulli, A. (2023). Carboxymethylcellulose-based hydrogel obtained from bacterial cellulose. *Molecules*, 28(2), 829. <https://doi.org/10.3390/molecules28020829>
48. Lee, H., Jung, S., Yoon, S., Yoon, W., Park, T., Kim, S., Shin, H., Hwang, D., & Jung, S. (2019). Immobilization of planktonic algal spores by inkjet printing. *Scientific Reports*, 9(1), 12357. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48776-z>
49. Lemr, K., & Borovcová, L. (2020). Ionizace elektrosprejem. *Chemické listy*, 114(3), 169–178.
50. Lentz, R., Sojka, R., Carter, D., & Shainberg. (1992). Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6), 1926–1932. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600060046x>
51. Li, J., & Mooney, D. (2016). Designing hydrogels for controlled drug delivery. *Nature Reviews Materials*, 1(12), 16071. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.71>
52. Lima, M., Furmam, F., Karas, P., Hyeda, D., Takahashi, W., Pinto, A., Galvão, C., Tenório, E., & Etto, R. (2023). *Azospirillum brasilense* AbV5/6 encapsulation in dual-crosslinked beads based on cationic starch. *Carbohydrate Polymers*, 308, 120631. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120631>
53. Liu, Y., Liu, X., Duan, B., Yu, Z., Cheng, T., Yu, L., Liu, L., & Liu, K. (2021). Polymer–water interaction enabled intelligent moisture regulation in hydrogels. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 12(10), 2587–2592. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c00034>
54. Lu, H., Yuan, L., Yu, X., Wu, C., He, D., & Deng, J. (2018). Recent advances of on-demand dissolution of hydrogel dressings. *Burns & Trauma*, 6(35). <https://doi.org/10.1186/s41038-018-0138-8>
55. Machado, N., Fernández, M., Häring, M., Saldías, C., & Díaz, D. (2019). Niosomes encapsulated in biohydrogels for tunable delivery of phytoalexin resveratrol. *RSC Advances*, 9(14), 7601–7609. <https://doi.org/10.1039/C8RA09655D>
56. Madduma, U., & Madihally, S. (2021). Synthetic hydrogels: Synthesis, novel trends, and applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(19), 50376. <https://doi.org/10.1002/app.50376>

57. Mali, K., Dhawale, S., Dias, R., Dhane, N., & Ghorpade, V. (2018). Citric acid crosslinked carboxymethyl cellulose-based composite hydrogel films for drug delivery. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *80*(4), 657–667. <https://doi.org/10.4172/pharmaceutical-sciences.1000405>
58. Malik, S., Chaudhary, K., Malik, A., Punia, H., Sewhag, M., Berkesia, N., Nagora, M., Kalia, S., Malik, K., Kumar, D., Kumar, P., Kamboj, E., Ahlawat, V., Kumar, A., & Boora, K. (2022). Superabsorbent polymers as a soil amendment for increasing agriculture production with reducing water losses under water stress condition. *Polymers*, *15*(1), 161. <https://doi.org/10.3390/POLYM15010161>
59. 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>
60. Mohawesh, O., & Durner, W. (2019). Effects of Bentonite, Hydrogel and Biochar Amendments on Soil Hydraulic Properties from Saturation to Oven Dryness. *Pedosphere*, *29*(5), 598–607. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60426-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60426-0)
61. Muzzarelli, R. (1983). Chitin and its derivatives: New trends of applied research. *Carbohydrate Polymers*, *3*(1), 53–75. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(83\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0144-8617(83)90012-7)
62. Naser, A., Deiab, I., & Darras, B. (2021). Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. *RSC Advances*, *11*(28), 17151–17196. <https://doi.org/10.1039/D1RA02390J>
63. Neethu, T., Dubey, P., & Kaswala, A. (2018). Prospects and applications of hydrogel technology in agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *7*(05), 3155–3162. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.705.369>
64. Niculescu, A., & Grumezescu, A. (2022). Applications of chitosan-alginate-based nanoparticles — an up-to-date review. *Nanomaterials*, *12*(2), 186. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nano12020186>
65. Nie, H., Liu, M., Zhan, F., & Guo, M. (2004). Factors on the preparation of carboxymethylcellulose hydrogel and its degradation behavior in soil. *Carbohydrate Polymers*, *58*(2), 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.06.035>
66. Ojeda, D., Canales, A., Matias, J., Gomez, U., & Mateos, J. (2020). Potential of chitosan and its derivatives for biomedical applications in the central nervous system. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*(389), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00389>

67. Olad, A., Zebhi, H., Salari, D., Mirmohseni, A., & Reyhani Tabar, A. (2018). Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering: C*, 90, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.083>
68. ONU-agua. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos: Agua y cambio climático*.
69. Pal, A., Adhikary, R., Bera, M., Garanayak, R., & Kumar, S. (2020). Soil and water quality for healthy crop: A review. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 13(12), 73–77.
70. Pandit, A., Adholeya, A., Cahill, D., Brau, L., & Kochar, M. (2020). Microbial biofilms in nature: unlocking their potential for agricultural applications. *Journal of Applied Microbiology*, 129(2), 199–211. <https://doi.org/10.1111/JAM.14609>
71. Panescu, P., Browne, M., Chen, K., Sack, L., & Maynard, H. (2022). Effects of trehalose and polyacrylate-based hydrogels on tomato growth under drought. *AoB PLANTS*, 14(4). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plac030>
72. Parveen, I., Maraz, K., Mahmud, I., & Khan, R. (2019). Seaweed based bio polymeric film and their application: A review on hydrocolloid polysaccharides. *Scientific Review*, 5(5), 93–102. <https://doi.org/10.32861/SR.55.93.102>
73. Pathak, V., & Ambrose, R. (2020). Starch-based biodegradable hydrogel as seed coating for corn to improve early growth under water shortage. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(14), 48523. <https://doi.org/10.1002/APP.48523>
74. Pedroso, S., & Fleitas, N. (2020). Ionotropic gelation method in the synthesis of nanoparticles/microparticles for biomedical purposes. *Polymer International*, 69(5), 443–447. <https://doi.org/10.1002/pi.5970>
75. Petri, D. (2015). Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(23), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/app.42035>
76. Phetwarotai, W., Potiyaraj, P., & Aht, D. (2013). Biodegradation of polylactide and gelatinized starch blend films under controlled soil burial conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 21(1), 95–107. <https://doi.org/10.1007/S10924-012-0530-6/FIGURES/8>
77. Pirsá, S., Khodaei, S., Karimi, I., Ghasemi, Y., Jawhar, Z., & Eghbaljoo, H. (2022). Hydrogels and biohydrogels: investigation of origin of production, production methods, and application. *Polymer Bulletin*, 1–40. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04580-w>

78. Pour, M., Saberi, R., Esmaeilzadeh, K., Mohammadinejad, R., & Loit, E. (2021). Evaluation of *Bacillus velezensis* for biological control of *Rhizoctonia solani* in bean by alginate/gelatin encapsulation supplemented with nanoparticles. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(10), 1373–1382. <https://doi.org/10.4014/JMB.2105.05001>
79. Qamruzzaman, M., Ahmed, F., & Mondal, M. (2022). An overview on starch-based sustainable hydrogels: potential applications and aspects. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(1), 19–50. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02180-9>
80. Qu, B., & Luo, Y. (2020). Chitosan-based hydrogel beads: Preparations, modifications and applications in food and agriculture sectors – A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.240>
81. Quiñones, J., Peniche, H., & Peniche, C. (2018). Chitosan based self-assembled nanoparticles in drug delivery. *Polymers*, 10(3), 235. <https://doi.org/10.3390/polym10030235>
82. Raghuwanshi, V., & Garnier, G. (2019). Characterisation of hydrogels: Linking the nano to the microscale. *Advances in Colloid and Interface Science*, 274, 102044. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102044>
83. Reglamento de la UE. (2019). *Regulation (EU) 2019/1009 of the european parliament and of the council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing regula.*
84. Research and Markets. (2022, marzo). *Global agricultural biologicals market by function, product type (microbials, macrobials, semiochemicals, natural products), mode of application (foliar spray, Soil & seed treatment), crop type, and region - forecast to 2027*. Research and Markets. <https://www.researchandmarkets.com/reports/4995068>
85. Rhein, N., Ale, M., Ajalloueian, F., & Meyer, A. (2017). Characterization of alginates from Ghanaian brown seaweeds: *Sargassum* spp. and *Padina* spp. *Food Hydrocolloids*, 71, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.016>
86. Ritonga, H., Nurfadillah, A., Rembon, F., Ramadhan, L., & Nurdin, M. (2019). Preparation of chitosan-EDTA hydrogel as soil conditioner for soybean plant (*Glycine max*). *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100277. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100277>
87. Rojas, J., de Bashan, L., Parra, F., Rocha, J., & de los Santos, S. (2022). Microencapsulation of *Bacillus* strains for improving wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) growth and development. *Plants*, 11(21), 2920. <https://doi.org/10.3390/plants11212920>

88. Rozo, G., Bohorques, L., & Santamaría, J. (2019). Controlled release fertilizer encapsulated by a κ -carrageenan hydrogel. *Polímeros*, 29(3), 1–7. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.02719>
89. Saberi, R., & Moradi, M. (2021). A novel encapsulation of *Streptomyces fulvissimus* Uts22 by spray drying and its biocontrol efficiency against *Gaeumannomyces graminis*, the causal agent of take-all disease in wheat. *Pest Management Science*, 77(10), 4357–4364. <https://doi.org/10.1002/ps.6469>
90. Sahoo, D., & Biswal, T. (2021). Alginate and its application to tissue engineering. *SN Applied Sciences*, 3(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04096-w>
91. Sankalia, M., Mashru, R., Sankalia, J., & Sutariya, V. (2006). Stability improvement of alpha-amylase entrapped in kappa-carrageenan beads: Physicochemical characterization and optimization using composite index. *International Journal of Pharmaceutics*, 312(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2005.11.048>
92. Seybold, C. (1994). Polyacrylamide review: Soil conditioning and environmental fate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(11–12), 2171–2185. <https://doi.org/10.1080/00103629409369180>
93. Shengqiang, T., & Dongli, S. (2018). Synergistic effects of rock fragment cover and polyacrylamide application on erosion of saline-sodic soils. *CATENA*, 171, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.033>
94. Skrzypczak, D., Mikula, K., & Witek, A. (2019). Hydrogel capsules with alfalfa as micronutrients carrier. *SN Applied Sciences*, 1(6), 573. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0575-4>
95. Sojka, R., Lentz, R., Ross, C., Trout, T., Bjorneberg, D., & Aase, J. (1998). Polyacrylamide effects on infiltration in irrigated agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 53(4), 325–331.
96. Sorze, A., Valentini, F., Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2023). Development of a xanthan gum based superabsorbent and water retaining composites for agricultural and forestry applications. *Molecules*, 28(4), 1952. <https://doi.org/10.3390/molecules28041952>
97. Supare, K., & Mahanwar, P. (2022). Starch-chitosan hydrogels for the controlled-release of herbicide in agricultural applications: A study on the effect of the concentration of raw materials and crosslinkers. *Journal of Polymers and the Environment*, 30(6), 2448–2461. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02379-4>
98. Suriyatem, R., Auras, R., & Rachtanapun, P. (2019). Utilization of carboxymethyl cellulose from durian rind agricultural waste to improve physical properties and stability of rice starch-based film. *Journal of Polymers and*

- the Environment*, 27(2), 286–298. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1343-z>
99. Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Iqbal, M., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, 121, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.030>
 100. Tabra, K., Arellano, E., Contreras, S., & Ginocchio, R. (2020). Evaluation of phytotoxic effects of cationic polyacrylamide polymers: implication for the use of sludges as organic soil amendments in assisted phytostabilization. *International Journal of Phytoremediation*, 22(10), 1068–1074. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1726870>
 101. Tang, J., Lin, N., Zhang, Z., Pan, C., & Yu, G. (2019). Nanopolysaccharides in emulsion stabilization. En N. Lin, J. Tang, A. Dufresne, & M. Tam (Eds.), *Advanced Functional Materials from Nanopolysaccharides. Springer Series in Biomaterials Science and Engineering* (pp. 221–254). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0913-1_6
 102. Thye, K., Wan, W., Balia, Z., Wee, C., Ong, J., Loh, J., Cheng, W., Lamasudin, D., & Lai, K. (2022). λ -Carrageenan promotes plant growth in banana via enhancement of cellular metabolism, nutrient uptake, and cellular homeostasis. *Scientific Reports*, 12(1), 19639. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21909-7>
 103. Turioni, C., Guerrini, G., Squartini, A., Morari, F., Maggini, M., & Gross, S. (2021). Biodegradable hydrogels: evaluation of degradation as a function of synthesis parameters and environmental conditions. *Soil Systems*, 5(3), 47. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030047>
 104. Tyler, B., Gullotti, D., Mangraviti, A., Utsuki, T., & Brem, H. (2016). Polylactic acid (PLA) controlled delivery carriers for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.018>
 105. Urtuvia, V., Maturana, N., Acevedo, F., Peña, C., & Díaz, A. (2017). Bacterial alginate production: an overview of its biosynthesis and potential industrial production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 198. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2363-x>
 106. Varghese, S., Rangappa, S., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). Natural polymers and the hydrogels prepared from them. En Y. Chen (Ed.), *Hydrogels Based on Natural Polymers* (pp. 17–47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816421-1.00002-1>
 107. Verhelst, A. (2021). Los Hidrocoloides alimentarios obtenidos a partir de productos vegetales. *Revista de Investigación Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 5(1), 39–44.

108. Wang, H., She, D., Fei, Y., & Tang, S. (2019). Synergic effects of biochar and polyacrylamide amendments on the mechanical properties of silt loam soil under coastal reclamation in China. *CATENA*, 182, 104152. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104152>
109. Wang, X., Tang, D., & Wang, W. (2021). Characterization of *Pseudomonas protegens* SN15-2 microcapsule encapsulated with oxidized alginate and starch. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 70(10), 684–692. <https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1760270>
110. Whipple, W., & Zheng, H. (2014). Water-soluble free radical addition polymerizations: polyacrylamides. *Plastics Engineering*, 70(8), 44–48. <https://doi.org/10.1002/j.1941-9635.2014.tb01232.x>
111. Wiśniewska, M. (2018). High performance polymers and their nanocomposites. En V. P & S. A (Eds.), *High Performance Polymers and Their Nanocomposites*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119363910>
112. Xu, T., Zhu, W., & Sun, J. (2022). Structural modifications of sodium polyacrylate-polyacrylamide to enhance its water absorption rate. *Coatings*, 12(9), 1234. <https://doi.org/10.3390/coatings12091234>
113. Yahia, Lh. (2015). History and applications of hydrogels. *Journal of Biomedical Sciences*, 4(2), 1–23. <https://doi.org/10.4172/2254-609X.100013>
114. Zainal, S., Mohd, N., Suhaili, N., Anuar, F., Lazim, A., & Othaman, R. (2021). Preparation of cellulose-based hydrogel: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 935–952. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.012>
115. Zheng, L., Ma, X., Lang, D., Zhang, X., Zhou, L., Wang, L., & Zhang, X. (2022). Encapsulation of *Bacillus pumilus* G5 from polyvinyl alcohol-sodium alginate (PVA-SA) and its implications in improving plant growth and soil fertility under drought and salt soil conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.017>
116. Zhou, C., So, P., & Chen, X. (2020). A water retention model considering biopolymer-soil interactions. *Journal of Hydrology*, 586, 124874. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124874>
117. Zvinavashe, A., Laurent, J., Mhada, M., Sun, H., Fouda, H., Kim, D., Mouhib, S., Kouisni, L., & Marelli, B. (2021). Programmable design of seed coating function induces water-stress tolerance in semi-arid regions. *Nature Food*, 2(7), 485–493. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00315-8>