

Efecto de hidrogeles biodegradables sobre la retención de humedad y la germinación de alfalfa

Effect of biodegradable hydrogels on moisture retention and germination of alfalfa

Elan Iñaky Laredo-Alcalá¹ ,
Azael Salinas-Gutiérrez² ,
Mónica Lizeth Chávez-
Martínez² ,
Norma Paola Meléndez-
Rentería¹ ,
Cynthia Lizeth Barrera-
Martínez¹ ,
Thalía Athenas Salinas-Jasso¹ ,
Miguel Ángel De León-Zapata^{1*} 

¹Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad y Ecología de Coahuila (CICBEC). Universidad Autónoma de Coahuila. Ing. J. Cárdenas Valdez S/N. Col. República, CP. 25280. Saltillo, Coahuila, México.

²Departamento de Investigación de Alimentos (DIA-UAdEC). Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila. Ing. J. Cárdenas Valdez S/N. Col. República, CP. 25280. Saltillo, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia:
miguel.leon@uadec.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 23 de septiembre 2022

Aceptado: 01 de mayo 2023

Como citar: Laredo-Alcalá EI, Salinas-Gutiérrez A, Chávez-Martínez ML, Meléndez-Rentería NP, Barrera-Martínez CL, Salinas-Jasso TA, De León-Zapata MA (2023) Efecto de hidrogeles biodegradables sobre la retención de humedad y la germinación de alfalfa. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(2): e3133. DOI: 10.19136/era.a10n2.3133

RESUMEN. Los hidrogeles biodegradables obtenidos de fuentes naturales son materiales no tóxicos y con una gran capacidad de retención de agua, por lo que constituyen una valiosa alternativa para el uso racional del agua en aplicaciones agrícolas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de hidrogeles formulados a partir de polímeros naturales (alginato, polisacáridos de nopal, polisacáridos de aloe y quitosano) sobre la capacidad de retención de agua, el potencial biodegradable, así como la morfometría y germinación de plántulas de alfalfa en comparación con el hidrogel de poliacrilato de potasio (control comercial). Se caracterizaron un total de 36 tratamientos bajo condiciones controladas a nivel laboratorio, obteniendo que, en comparación con el control comercial, el hidrogel de PSGCL presentó el mayor valor de retención de agua y todos los demás tratamientos obtenidos a partir de polímeros naturales presentaron mayor potencial biodegradable. En cuanto a la germinación de plántulas de alfalfa, el hidrogel PSGP presentó el comportamiento más destacado en cuanto a porcentaje de germinación, altura de planta y desarrollo de follaje con respecto al testigo absoluto y al resto de los tratamientos.

Palabras clave: Agua, riego, eficiencia, biopolímeros, sustentabilidad.

ABSTRACT. Biodegradable hydrogels obtained from natural sources are non-toxic materials with a large water retention capacity, hence a valuable alternative for the rational use of water in agriculture applications. The aim of the present work was to evaluate the effect of hydrogels formulated from natural polymers (alginate, nopal polysaccharides, aloe polysaccharides, and chitosan) on water retention capacity, biodegradable potential as well as the morphometry and germination of alfalfa seedlings compared with potassium polyacrylate hydrogel (commercial control). A total of 36 treatments were characterized under controlled conditions at the laboratory level obtaining that in comparison with the commercial control, PSGCL hydrogel presented the highest water retention value, whereas all the hydrogels obtained from natural polymers had greater biodegradable potential. Regarding to germination of alfalfa seedlings, PSGP hydrogel presented the most outstanding performance in term of percentage of germination, plant height and foliage development with respect to absolute control and the rest of the treatments.

Key words: Water, irrigation, efficiency, biopolymers, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El agua es considerada desde siempre como el factor que más incide en la producción de alimentos a nivel mundial (Andrada y Di-Barbaro 2018). En el norte de México los requerimientos de agua para el cultivo de alfalfa son de 1.40 m por año, pero se aplica una lámina de agua de 2.5 m, lo que representa una extracción adicional de 352 millones de m³, si se considera la superficie destinada a este cultivo (Medina-García et al. 2020). En el Valle de Cuatrociénegas, Coahuila, México, los cultivos de alfalfa absorben gran parte del agua de sus acuíferos y a esto se atribuye la sequedad de las lagunas de esta área natural protegida; por consiguiente, el uso ineficiente del agua de riego en la alfalfa es el principal factor relacionado con el abatimiento del manto acuífero, cuyo descenso anual es de 2.1 a 7.0 m al año (Felstead et al. 2015).

Como alternativa a este problema se propone el uso de hidrogeles, los cuales son polímeros con capacidad de almacenar grandes cantidades de agua y existe un creciente interés en este material como mitigador de estrés hídrico en condiciones de sequía (Cisneros et al. 2020). A pesar de que hay una gran cantidad de formulaciones de hidrogel desarrolladas a escala de laboratorio, la mayoría son formulaciones sintéticas y son pocas las que cumplen con requisitos importantes como respetar el medio ambiente, como la no toxicidad, la biodegradabilidad y otras (Rivera-Fernández et al. 2021). Por lo tanto, los polímeros que son biodegradables pueden usarse como alternativa a los polímeros sintéticos (Saruchi et al. 2019).

Algunos ejemplos de polímeros naturales y biodegradables son el alginato, quitosán, polisacáridos de nopal y de sábila. Los alginatos son sales copoliméricas de ácido algínico, un polisacárido natural proveniente de especies de algas marinas pardas (*Laminaria hyperborean*, *Ascophyllum nodosum* y *Macrocystis pirifera*). La importancia de los alginatos está dada por su capacidad para formar hidrocoloides, es decir, la capacidad de hidratarse en agua caliente o fría dando lugar a soluciones muy vis-

cosas, dispersiones o geles (Junyan et al. 2023). El quitosano es un biopolímero catiónico lineal obtenido por la desacetilación parcial de la quitina mediante hidrólisis alcalina a altas temperaturas. Es un polisacárido estructural del exoesqueleto de los crustáceos, presente también en insectos, hongos, levaduras y moluscos. El quitosano posee un número variado de aplicaciones en diversas áreas, especialmente en el área biomédica, dada su alta biocompatibilidad y baja toxicidad (Parsana et al. 2023). El nopal se encuentra naturalmente en regiones áridas y semiáridas de muchos países incluyendo México y Estados Unidos. Contiene una sustancia pegajosa llamada mucílago, que ha sido comúnmente usado de manera casera como adhesivo para aumentar la dureza del concreto, así como impermeabilizante y pintura, además de ser usado en la industria alimenticia y farmacéutica (Cortés-Camargo et al. 2023). La sábila *Aloe vera*, pertenece a la familia de las asfodeláceas o liláceas. El gel o pulpa de sábila es una masa gelatinosa e incolora formada por células parenquimáticas, estructuradas en colénquima y células pétreas delgadas. El gel está formado principalmente de agua, mucílagos y otros carbohidratos (Hadi et al. 2022).

En las últimas décadas, se han propuesto varios tipos de hidrogel basados en polisacáridos para aplicaciones agrícolas, debido a sus excelentes propiedades hidrofílicas (alta capacidad de hinchamiento), excelente biocompatibilidad y biodegradabilidad. Debido al bajo costo, la abundancia y las propiedades ecológicas, los polisacáridos se señalan como sustitutos de los derivados del petróleo en la preparación del hidrogel (Junyan et al. 2023). Considerando lo anterior y como una alternativa natural para el uso racional del agua de riego en el cultivo de alfalfa, el objetivo de este estudio fue evaluar comparar los hidrogeles elaborados con polímeros naturales con el hidrogel comercial de acrilato de potasio con respecto a la capacidad de retención hídrica, potencial biodegradable, el efecto en germinación y morfometría de plántulas de alfalfa a nivel laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material

Los polisacáridos de nopal y sábila fueron obtenidos en la Empresa Fitokímica Industrial de México, Saltillo, Coahuila. El alginato, tween 80, agua destilada, glicerol, goma xantana, persulfato de potasio, carbonato de calcio y cloruro de calcio se adquirieron de Sigma-Aldrich Chemicals (St. Louis, EE. UU.). Todos los demás productos químicos utilizados fueron de calidad analítica. Las semillas de alfalfa (*Medicago sativa*), acrilato de potasio como hidrogel comercial y sustrato Peat Moss fueron adquiridos en un centro de Agroinsumos de la Ciudad de Monclova, Coahuila.

Elaboración de hidrogeles con polímeros naturales

Para la elaboración de los hidrogeles, se prepararon 10 mL de soluciones poliméricas por separado de alginato, polisacáridos de nopal, polisacáridos de sábila y quitosano al 2% p/v en agua destilada. Con la finalidad de mejorar la homogenización de las soluciones, se colocaron en un baño ultrasónico a 35 °C durante 30 minutos aproximadamente. Posteriormente, se prepararon 10 mL de soluciones estabilizantes por separado de glicerol, tween 80 y goma xantana grado alimenticio al 2% p/v en agua destilada. A cada solución estabilizante por separado se adicionó cada una de las sales de persulfato de potasio, carbonato de calcio y cloruro de calcio a una concentración del 1M, en base al volumen de cada solución estabilizante. Las soluciones estabilizantes se agregaron por separado a cada una de las soluciones poliméricas por goteo con la ayuda de una jeringa de 10 mL, y se dejaron reaccionar durante 10 minutos; posteriormente se sometieron a un secado a 70 °C para promover la copolimerización y después fueron pulverizados. Se obtuvieron un total de 36 tratamientos (Tabla 1), los cuales se almacenaron en un recipiente de vidrio en un lugar seco y libre de humedad hasta su uso.

Caracterización de hidrogeles con polímeros naturales

Los 36 hidrogeles formulados con polímeros naturales se caracterizaron en términos de capacidad de retención hídrica y potencial biodegradable en comparación con el hidrogel comercial de acrilato de potasio como testigo comercial (TC). Los resultados se analizaron estadísticamente mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5%, utilizando el software Statistica® 7 (StatSoft Inc., Tulsa, EE. UU.). Una vez caracterizados se seleccionaron los hidrogeles que presentaron los mejores resultados en términos de capacidad de retención hídrica y potencial biodegradable, para posteriormente evaluar su efecto de germinación y morfométrico sobre plántulas de alfalfa a nivel laboratorio.

La capacidad de retención hídrica se llevó a cabo sumergiendo 0.1 g de cada muestra de los hidrogeles formulados a partir de polímeros naturales, así como del hidrogel comercial en agua destilada durante un tiempo de 120 minutos, después el agua se drenó y se registró el peso final de los hidrogeles hinchados. Cada medición se realizó por triplicado. Para calcular el porcentaje de retención hídrica se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Retención hídrica}(\%) = ((W_f - W_i)/W_i) \times 100$$

Donde: W_f = peso final del material y W_i = peso inicial del material.

Las muestras de hidrogeles formulados a partir de polímeros naturales, así como del testigo comercial fueron sometidas a una prueba de biodegradabilidad a la intemperie a temperatura ambiente con una duración de 30 días. Donde, la prueba consistió en pesar 5 g de cada una de las muestras de hidrogel y del testigo comercial en una balanza analítica, posteriormente se colocaron las muestras en recipientes de vidrio sin tapa. Finalmente, los recipientes se colocaron al aire libre durante 30 días y después se pesaron las muestras con una balanza analítica. Cada medición se realizó por triplicado. Para calcular el porcentaje del potencial biodegradable se utilizó la siguiente fórmula:

Tabla 1. Hidrogeles elaborados con polímeros naturales.

Número de tratamientos	Tratamientos	Simbología
1	Alginato + Glicerol/persulfato de potasio	AGP
2	Alginato + Glicerol/carbonato de calcio	AGCO
3	Alginato + Glicerol/cloruro de calcio	AGCL
4	Alginato + Tween 80/persulfato de potasio	ATP
5	Alginato + Tween 80/carbonato de calcio	ATCO
6	Alginato + Tween 80/cloruro de calcio	ATCL
7	Alginato + Goma xantana/persulfato de potasio	AXP
8	Alginato + Goma xantana/carbonato de calcio	AXCO
9	Alginato + Goma xantana/cloruro de calcio	AXCL
10	Polisacáridos de nopal + Glicerol/persulfato de potasio	PNGP
11	Polisacáridos de nopal + Glicerol/carbonato de calcio	PNGCO
12	Polisacáridos de nopal + Glicerol/cloruro de calcio	PNGCL
13	Polisacáridos de nopal + Tween 80/persulfato de potasio	PNTP
14	Polisacáridos de nopal + Tween 80/carbonato de calcio	PNTCO
15	Polisacáridos de nopal + Tween 80/cloruro de calcio	PNTCL
16	Polisacáridos de nopal + Goma xantana/persulfato de potasio	PNXP
17	Polisacáridos de nopal + Goma xantana/carbonato de calcio	PNXCO
18	Polisacáridos de nopal + Goma xantana/cloruro de calcio	PNXCL
19	Polisacáridos de sábila + Glicerol/persulfato de potasio	PSGP
20	Polisacáridos de sábila + Glicerol/carbonato de calcio	PSGCO
21	Polisacáridos de sábila + Glicerol/cloruro de calcio	PSGCL
22	Polisacáridos de sábila + Tween 80/persulfato de potasio	PSTP
23	Polisacáridos de sábila + Tween 80/carbonato de calcio	PSTCO
24	Polisacáridos de sábila + Tween 80/cloruro de calcio	PSTCL
25	Polisacáridos de sábila + Goma xantana/persulfato de potasio	PSXP
26	Polisacáridos de sábila + Goma xantana/carbonato de calcio	PSXCO
27	Polisacáridos de sábila + Goma xantana/cloruro de calcio	PSXCL
28	Quitosano + Glicerol/persulfato de potasio	QGP
29	Quitosano + Glicerol/carbonato de calcio	QGCO
30	Quitosano + Glicerol/cloruro de calcio	QGCL
31	Quitosano + Tween 80/persulfato de potasio	QTP
32	Quitosano + Tween 80/carbonato de calcio	QTCO
33	Quitosano + Tween 80/cloruro de calcio	QTCL
34	Quitosano + Goma xantana/persulfato de potasio	QXP
35	Quitosano + Goma xantana/carbonato de calcio	QXCO
36	Quitosano + Goma xantana/cloruro de calcio	QXCL
37	Testigo comercial (Acrilato de potasio)	TC y TQ
38	Control absoluto (Sin tratamiento)	T

Potencial biodegradable(%) =

$$100 - (((\text{Peso final})/(\text{Peso inicial})) \times 100)$$

Aplicación de hidrogeles, efecto en la germinación y morfometría de las plántulas de alfalfa

El experimento se desarrolló en el verano del 2021. Se colocaron semillas de alfalfa (*Medicago sativa*) en recipientes plásticos con 300 g de sustrato peat moss. Se evaluaron 6 tratamientos: PSGP (Polisacáridos de sábila + Glicerol/persulfato de potasio); PNGP (Polisacáridos de nopal + Glicerol/persulfato de potasio); PNGCO (Polisacáridos de nopal + Glicerol/carbonato de calcio); PSGCL

(Polisacáridos de sábila + Glicerol/cloruro de calcio); TC (Testigo comercial); y TQ (Control absoluto), cada uno con 10 repeticiones, tomando como unidad experimental cada una de las plántulas. Previamente a la siembra en el sustrato se adicionaron 125 g de hidrogel por cada kg de sustrato, ambos se mezclaron y se homogenizaron. Una vez obtenida la mezcla se colocaron las semillas de alfalfa y se adicionaron 400 mL de agua en todos los tratamientos y repeticiones, el cual fue previamente determinado basándose en obtener un punto de saturación. Al término del riego los recipientes plásticos con semilla, sustrato peat moss y tratamientos aplicados fueron colocados en malla sombra en las instalaciones del Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad

y Ecología de Coahuila, ubicado en Cuatro Ciénegas, Coahuila. Una vez transcurridos 21 días se evaluaron los resultados. Se determinó la altura de la planta, longitud de raíz y número de hojas. De igual forma, se evaluó el porcentaje de germinación a los 8 días posteriores a la siembra. El experimento se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar. Los resultados obtenidos fueron analizados con la prueba de comparación de medias Tukey al 0.05% de significancia, utilizando el programa SAS.

RESULTADOS

Capacidad de retención hídrica de hidrogeles formulados con polímeros naturales

Los resultados indican que el tratamiento PSGCL presentó el mayor valor de retención de agua ($714 \pm 40.84\%$), y el tratamiento PNXCL mostró el menor valor de retención de agua ($132 \pm 11.35\%$) en comparación con el testigo comercial (TC) ($624 \pm 44.84\%$). Los resultados demostraron que los tratamientos PSGCL, PSGP, AGP, TC, AGCO, AGCL, ATCL, ATCO y PSXP presentaron los mejores resultados para retener agua sin presentar diferencias significativas con el testigo comercial (TC) ($624 \pm 44.84\%$), con valores de retención de agua de 714 ± 40.84 , 665 ± 38.93 , 640 ± 37.85 , 624 ± 44.84 , 612 ± 10.81 , 598 ± 11.13 , 590 ± 11.13 , 570 ± 33.64 y $562 \pm 10.58\%$, respectivamente (Tabla 2).

Potencial biodegradable de hidrogeles formulados con polímeros naturales

Los resultados demuestran que todos los tratamientos obtenidos a partir de polímeros naturales tuvieron mayor potencial biodegradable en comparación con el testigo comercial (TC) ($2.83 \pm 0.20\%$), donde el tratamiento PNGP ($30.36 \pm 0.58\%$) presentó el mayor valor de biodegradabilidad (Tabla 2). Los resultados señalaron que los tratamientos PNGP, PNGCL, PSGP, AGP, PNGCO, PSGCL y PNTP presentaron los mejores resultados de biodegradabilidad sin presentar diferencias significativas con valores de biodegradabilidad de 30.36 ± 0.58 , 29 ± 1.0 , 28.6 ± 0.26 , 27.66 ± 1.15 , 25.56 ± 1.50 , 24.4 ± 0.36 , 24.2 ± 0.1 y $23.86 \pm 0.15\%$,

respectivamente. Sin embargo, si presentaron diferencia estadística con el testigo comercial (TC) ($2.83 \pm 0.20\%$). En base a los resultados obtenidos en las pruebas de retención hídrica y potencial biodegradable de los 36 tratamientos formulados, se seleccionaron los tratamientos PSGCL, PNGP, PSGP y PNGCO, los cuales mostraron los mejores resultados de retención de agua y biodegradabilidad en comparación con el acrilato de potasio como testigo comercial (TC), para posteriormente evaluar su efecto de germinación y morfométrico en plántulas de alfalfa.

Aplicación de hidrogeles, efecto en la germinación y morfometría de las plántulas de alfalfa

Los resultados obtenidos de la evaluación del porcentaje de germinación en la aplicación de hidrogeles con matrices biopoliméricas, demostró que el tratamiento PSGP fue quien presentó diferencia significativa en relación con el testigo absoluto. Este tratamiento (PSGP: $80 \pm 20\%$) presentó un 30% de germinación superior en comparación con el testigo absoluto ($50 \pm 10\%$) (Figura 1). En relación con los resultados de parámetros morfométricos, específicamente en la altura de la planta, se observó que los tratamientos PNGP ($4.40 \pm 0.230\text{cm}$) y PSGP ($4.066 \pm 0.230\text{cm}$) no presentaron diferencia significativa. Sin embargo, presentaron diferencia estadística con el resto los tratamientos PNGCO, PSGCL, TQ y T. El tratamiento formulado con polisacáridos de nopal, glicerol y persulfato de potasio y el PNGP mostraron un desarrollo superior al relacionado con el testigo químico ($3.43 \pm 0.057\text{cm}$) y el testigo absoluto ($3.13 \pm 0.14\text{cm}$) (Figura 1). En el caso de la longitud de raíz el tratamiento PSGCL ($2.40 \pm 0.1\text{cm}$) presentó diferencia significativa con el resto de los tratamientos, presentando un comportamiento superior al testigo químico ($2.066 \pm 0.115\text{cm}$) y absoluto ($1.666 \pm 0.152\text{cm}$). Finalmente, respecto al número de hojas el tratamiento PSGP ($14.333 \pm 2.081\ \#$) fue quien presentó diferencia significativa respecto al resto de los tratamientos. En comparación con el testigo absoluto ($6.51 \pm 1.732\ \#$), este tratamiento presentó un aumento en el número de hojas del 220.46% (Figura 1). El tratamiento PSGP presentó el efecto más so-

bresaliente en el desarrollo de plántulas de alfalfa en comparación con el testigo absoluto. Siendo superior al resto de los tratamientos en porcentaje de germinación, altura de planta y desarrollo de follaje.

Tabla 2. Capacidad de retención de agua y potencial biodegradable de hidrogeles obtenidos con polímeros naturales en comparación con el testigo comercial (TC).

Tratamiento	Retención hídrica (%)	Potencial biodegradable (%)
PSGCL	714 ^a	24.6 ^a
PSGP	665 ^a	28.6 ^a
AGP	640 ^a	27 ^a
TC	624 ^a	2.8 ^r
AGCO	612 ^a	22.8 ^c
AGCL	598 ^a	23.8 ^b
ATCL	590 ^a	19.6 ⁱ
ATCO	570 ^a	17.4 ^j
PSXP	562 ^a	19.6 ⁱ
AXCO	520 ^b	14.4 ^o
AXP	480 ^b	17.8 ^k
QGCO	448 ^b	18.4 ^j
QGP	422 ^c	23.8 ^b
PSXCO	412 ^c	13.8 ^o
QTCO	410 ^c	15.2
QXCL	398 ^c	12 ^q
AXCL	396 ^c	14.6 ^o
PSXCL	380 ^c	14 ^o
PNGCL	355 ^c	29 ^a
QTCL	349 ^c	12.4 ^q
QTP	345 ^c	20.6 ^g
PNXP	337 ^c	21.8 ^e
QXCO	335 ^c	12.4 ^q
PNTP	333 ^c	24.2 ^a
PSTCL	331 ^c	20.2 ^b
PNGP	320 ^c	30.4 ^a
QGCL	315 ^c	13.4 ^p
PNTCL	312 ^c	21.4 ^f
PNGCO	312 ^c	25.6 ^a
PNTCO	300 ^c	18.4 ^j
QXP	259 ^d	16.4 ^m
PSTP	257 ^d	23.8 ^b
PSTCO	218 ^e	18 ^j
PSGCO	199 ^e	20.6 ^g
PNXCO	166 ^f	15.6 ⁿ
ATP	165 ^f	22.4 ^d
PNXCL	132 ^g	16.4 ^m

El análisis estadístico utilizado fue Anova (Tukey, $p \leq 0.05$), donde valores con misma letra son estadísticamente iguales.

DISCUSIÓN

Capacidad de retención hídrica de hidrogeles formulados con polímeros naturales

Los tratamientos PSGCL, PSGP, y AGP, mostraron mayores valores de retención de agua en comparación con el testigo comercial (TC), esto

puede deberse a la composición y conformación de los polisacáridos naturales de sábila y de alginato empleados, ya que su capacidad de hinchamiento depende de los grupos ácidos o básicos presentes en su estructura, tales como -OH, -COOH, -CONH, entre otros factores como la capacidad hidrofílica de las cadenas poliméricas, la densidad de entrecruzamiento, la tacticidad y la cristalinidad (Parvathy y Jyothi 2012).

Los polisacáridos de sábila, y el alginato fueron los principales polímeros naturales de los hidrogeles que mostraron una mayor capacidad para retener agua, siendo el polisacárido de sábila el principal polímero retenedor de agua (Tabla 2). Esto debido a que los polisacáridos de sábila están constituidos principalmente de agua, mucílagos y otros carbohidratos, ácidos y sales orgánicas, enzimas, saponinas, taninos, heteróxidos antracénicos, esteroides, triacilglicéridos, aminoácidos, ARN, trazas de alcaloides, vitaminas y diversos minerales (Hadi *et al.* 2022), cuyos componentes interactúan con el agua formando redes poliméricas hidrofílicas tridimensionales reticuladas que son capaces de hincharse y retener un gran volumen de líquido en estado hinchado (Shin *et al.* 2010). El polímero natural de alginato demostró ser también una alternativa para la formulación de hidrogeles con buena capacidad para retener agua, debido a su naturaleza aniónica, es decir, presenta numerosos grupos químicos cargados negativamente, los cuales le permiten formar geles en presencia de cationes divalentes como: calcio, bario y estroncio (Junyan *et al.* 2023).

Actualmente existe reportes referentes a la capacidad de retención de agua de hidrogeles, donde los resultados del testigo comercial (TC) coinciden con los reportados por Arbona *et al.* (2005), quienes demostraron que hidrogeles comerciales a partir de acrilamida presentan un aumento de peso superior al 100% al usar una concentración de 0.1 a 0.4 g de hidrotendador. Por otro lado, Bres y Weston (1993) encontraron un porcentaje de retención superior a 300% en dos diferentes hidrotendadores comerciales de origen químico de acrilamina en un estudio realizado con la aplicación de fertilizantes. Los resultados obtenidos fueron superiores a los reportados por Liu *et al.* (2020) quienes demostraron

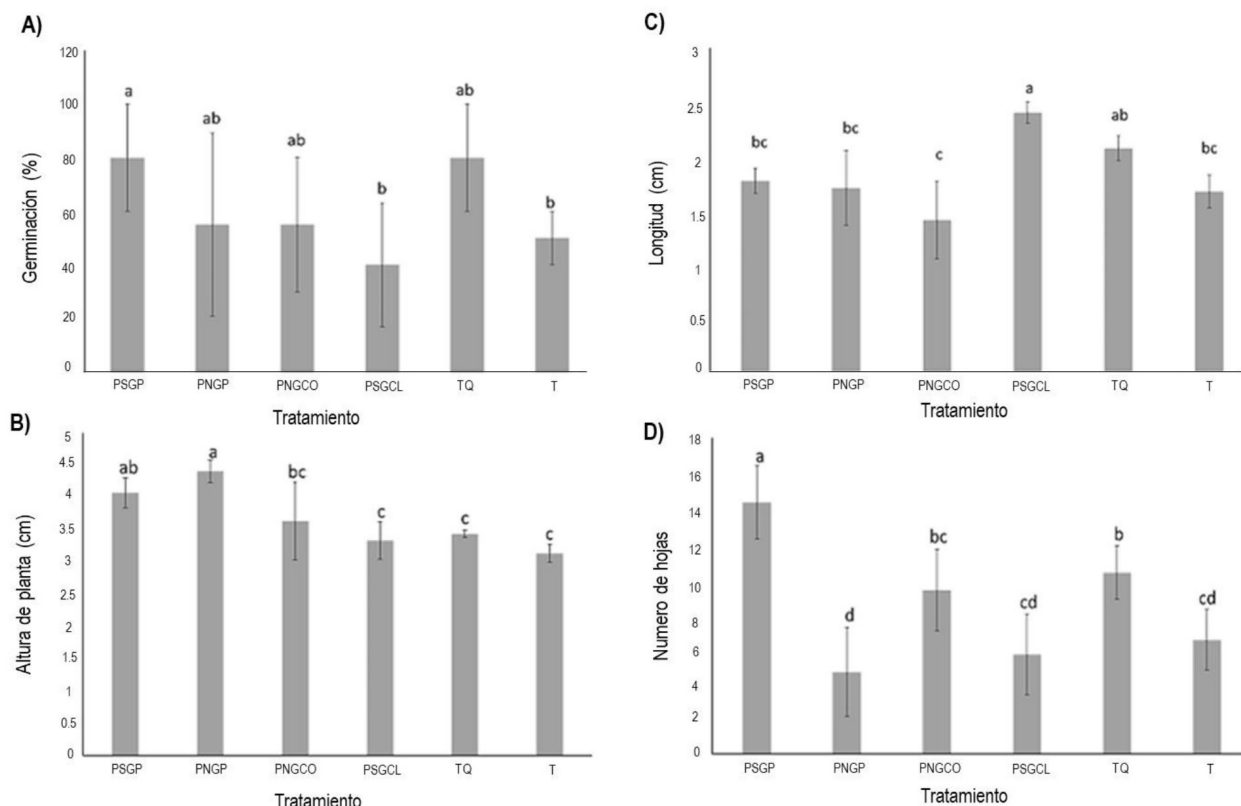


Figura 1. Evaluación *in vivo* de los hidrogeles con matrices poliméricas biodegradables. A) Porcentaje de germinación. Evaluación de parámetros morfológicos: B) Altura de la planta; C) Longitud de raíz; D) Número de hojas. El análisis estadístico utilizado fue Anova (Tukey, $p \leq 0.05$), donde valores con misma letra son estadísticamente iguales.

que un hidrogel formulado a partir de fenogreco, galactomananos y bórax mostró un índice de retención de agua del 16.28 al 35.53%. Así como el trabajo reportado por Pathak y Kumar (2017) quienes reportaron que un hidrogel obtenido a partir de carboximetilcelulosa, almidón y nanopartículas de SiO₂ tuvo una capacidad de retención de agua del 35%. También se ha confirmado que los hidrogeles a base de alginato-carboximetil celulosa-alfalfa tienen la capacidad de liberar iones Cu²⁺ como micronutriente para el desarrollo de plantas, incrementando hasta un 22% más la capacidad de hinchamiento en 48 h a pH 3.65 (Skrzypczak *et al.* 2019).

Potencial biodegradable de hidrogeles formulados con polímeros naturales

Los resultados demuestran que todos los tratamientos obtenidos a partir de polímeros naturales tuvieron mayor potencial biodegradable en com-

paración con el testigo comercial. Esto puede ser a causa de la composición fisicoquímica de las matrices poliméricas naturales, que las hace más susceptibles a la degradación por factores químicos, físicos, y biológicos, en comparación a la del testigo comercial que ha reportado escasa biodegradabilidad, a su vez también probablemente a algunas preocupaciones existentes en cuanto a su toxicidad y deposición en el suelo de cultivos agrícolas (Demetri *et al.* 2013).

Los hidrogeles obtenidos a partir de polímeros naturales en el presente estudio cuentan con un bajo nivel de toxicidad, debido a que fueron producidos por métodos de química verde en su preparación, lo cual los hace candidatos a ser una alternativa a los polímeros sintéticos en aplicaciones agrícolas (Saruchi *et al.* 2019). Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Song *et al.* (2020) quienes reportaron que un hidrogel obtenido a partir de lignina y alginato de sodio como polímeros natu-

rales mostró un 20% de biodegradabilidad a la intemperie cuando se entierra en el suelo.

Los polisacáridos de nopal, de sábila, y el alginato fueron los principales polímeros naturales de los hidrogeles que mostraron un mayor potencial biodegradable a la intemperie, siendo el polisacárido de nopal el principal polímero (Tabla 2). Esto debido a que el mucílago de nopal contiene agua, arabinosa, xilosa, galactosa, ácido galacturónico y ramnosa, además de calcio, potasio, sílice, sodio y en menor cantidad hierro, aluminio magnesio, y zinc, otros compuestos como glúcidos y compuestos nitrogenados, así como aminoácidos y ácidos orgánicos, cuyos componentes interaccionan en solución acuosa con cationes de calcio, plomo, bario, plata, cobre, hierro cobalto o níquel, precipitando el mucílago (Cortés-Camargo *et al.* 2023).

Aplicación de hidrogeles, efecto en la germinación y morfometría de las plántulas de alfalfa

El tratamiento PSGP presentó el efecto más sobresaliente en el desarrollo de plántulas de alfalfa en comparación con el testigo absoluto. Esto se puede atribuir a su composición basada en polisacáridos de sábila (*Aloe Vera*), la cual está compuesta de principalmente de agua, polisacáridos, azúcares, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos permitió una mayor capacidad de hinchamiento y rehidratación al sustrato durante un tiempo más prolongado. La composición química de la sábila le confiere múltiples características que la hacen atractiva para diversas aplicaciones. Una de las características más importantes es su naturaleza hidrofílica, la cual la hace capaz de actuar como un promotor de hidratación (Darzi *et al.* 2021). Lo anterior, ha sido publicado en la literatura especializada y se ha encontrado que la adición de *Aloe Vera* en la preparación de hidrogeles aumenta la absorción de agua y mejora las propiedades hidrofílicas de los mismos (Pereira *et al.* 2013).

La capacidad de hinchamiento/rehidratación de los hidrogeles en contacto con agua y su habilidad para liberar hasta el 95% de la misma en medios secos, ha sido de gran interés para su investigación en aplicaciones biomédicas, alimentarias

y agroindustriales (Tomadoni *et al.* 2019). En esta última, las investigaciones se han enfocado principalmente en el acondicionamiento del suelo, es decir, control de humedad y suministro de agua a las plantas. Asimismo, a la encapsulación y liberación de agroquímicos ya que además de las características mencionadas anteriormente, los hidrogeles, no solo pueden retener agua, sino que también pueden absorber nutrientes y otras sustancias como pesticidas para liberarlas gradualmente en suelo (Rizwan *et al.* 2021). En el 2020, Alvarado y Munzón (2020), utilizaron el gel de *Aloe Vera* como tratamiento a sustrato para mejorar el enraizamiento y desarrollo de plántulas de *Ficus benjamina* alcanzando un porcentaje de prendimiento de 54.17% y 1.95 brotes, superando a la hormona comercial (41.67% y 1.15 brotes). Además, se ha confirmado que las cortezas de *A. vera* pueden valorizarse mediante tratamientos ácidos combinados con ultrasonido para obtener nanofibras de celulosa. Los análisis SEM, FITR, TEM y TGA mostraron la eficiencia de este método para obtener nanofibras. Además, se encontró que la inclusión de nanofibras de celulosa en hidrogeles comerciales no reforzados puede aumentar la capacidad de hinchamiento de estos materiales (Guancha-Chalapud *et al.* 2022). También se ha reportado que el uso de un hidrogel a partir de quitosano-poliacrilamida en plantas de Alfalfa (*Medicago Sativa*) retiene el agua y reduce la tasa de evaporación evitando marchitez y estrés por sequía hasta 10 y 7 días (suelo aluvial y rojo, respectivamente), incrementando el crecimiento de la plántula hasta 1.52 y 1.41 veces más con respecto al control (suelo aluvial y rojo, respectivamente) (Pandey y De 2017).

Los hidrogeles a base de Tulipalin A [poli (acrilamida-co-sodio 4-hidroxi-2-metilenbutanoato)] han demostrado promover un 10% más el crecimiento de plantas monocotiledoneas de *Avena Sativa* en comparación con plantas que crecen en suelo sin hidrogeles (Rychter *et al.* 2019). Pero hasta el momento se encuentran muy pocos reportes respecto al uso de hidrogeles biopoliméricos y biodegradables con aplicaciones en el campo. Sin embargo, el uso de hidrogeles en la agricultura podría ser de gran utilidad para el crecimiento y nutrición de plantas dando lugar

al mejoramiento de sus características morfológicas.

CONCLUSIONES

Todos los hidrogeles tuvieron mayor potencial biodegradable en comparación con el acrilato de potasio. El tratamiento PSGP presentó los mayores efectos en el desarrollo de plántulas de alfalfa, porcentaje de germinación, altura de planta y desarrollo de follaje, en comparación con el testigo absoluto y fue superior al resto de los tratamientos. Los tratamientos PSGCL, PSGP, y AGP, mostraron mayores valores de retención de agua en comparación con el testigo comercial, siendo los tratamientos con polisacáridos de sábila los principales retene-

dores de humedad. Este es el primer trabajo en dar a conocer el desarrollo y aplicación de un hidrogel a partir de biopolímeros biodegradables, como el PSGP (polisacáridos de sábila, glicerol y persulfato de potasio), el cual representa una alternativa potencial y biodegradable para el uso racional del agua de riego en el cultivo de alfalfa.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo financiero brindado por el Fondo destinado a promover el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología en el Estado de Coahuila (FONCyT) dentro de la convocatoria 2020-C14 en la Modalidad "C" y a la Universidad Autónoma de Coahuila.

LITERATURA CITADA

- Alvarado-Aguayo A, Munzón-Quintana M (2020) Evaluación de la efectividad de gel de sábila y agua de coco como enraizantes naturales en diferentes sustratos para propagación asexual de árboles de ficus benjamina. *Agronomía Costarricense* 44: 65-78.
- Andrada H, Di-Barbaro G (2018) Efecto de la aplicación de copolímeros sobre el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas* 35: 27-35.
- Arbona V, Iglesias D, Jacas J, Primo-Millo E, Talon M, Gómez A (2005) Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants. *Plant and Soil* 270: 73-82.
- Bres W, Weston LA (1993) Influence of gel additives on nitrate, ammonium and water retention and tomato growth in a soil less medium. *Horticulture Science* 28: 1005-1007.
- Cisneros E, Cun R, Herrera J, González R, Cun S, Sarmiento O (2020) Efecto de los polímeros en la economía del agua. *Revista Ingeniería Agrícola* 10: 21-27.
- Cortés-Camargo S, Román-Guerrero A, Alvarez-Ramirez J, Alpizar-Reyes E, Velázquez-Gutiérrez SK, Pérez-Alonso C (2023) Microstructural influence on physical properties and release profiles of sesame oil encapsulated into sodium alginate-tamarind mucilage hydrogel beads. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 5: 100302. DOI: 10.1016/j.carpta.2023.100302.
- Darzi S, Paul K, Leitan S, Werkmeister J, Mukherjee S (2021) Immunobiology and application of aloe vera-based scaffolds in tissue engineering. *International Journal of Molecular Sciences* 22: 1708. DOI: 10.3390/ijms22041708.
- Demitri C, Scalera F, Madaghiele M, Sannino A, Maffezzoli A (2013) Potential of cellulose based super absorbent hydrogels as water reservoir in agriculture. *International Journal of Polymer Science* 2013: 1-6. DOI: 10.1155/2013/435073.
- Felstead N, Leng MJ, Metcalfe SE, Gonzalez S (2015) Understanding the hydrogeology and surface flow in the Cuatrocienegas Basin (NE Mexico) using stable isotopes. *Journal of Arid Environments* 121: 15-23.

- Guancha-Chalapud MA, Serna-Cock L, Tirado DF (2022) Aloe vera rind valorization to improve the swelling capacity of commercial acrylic hydrogels. *Fibers* 10: 73. DOI: 10.3390/fib10090073.
- Hadi A, Nawab A, Alam F, Zehra K (2022) Alginate/aloë vera films reinforced with tragacanth gum. *Food Chemistry: Molecular Sciences* 4: 100105. DOI: 10.1016/j.fochms.2022.100105.
- Junyan T, Yuning L, Yuqiong G, Yue Z, Xinying L, Dingxilei L, Xinyi L, Yang L (2023) Development of alginate-based hydrogels: Crosslinking strategies and biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules* 239: 124275. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124275.
- Liu Ch, Lei F, Li P, Jiang J, Wang K (2020) Borax crosslinked fenugreek galactomannan hydrogel as potential water-retaining agent in agriculture. *Carbohydrate Polymers* 236: 116100. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116100.
- Medina-García G, Echavarría-Cháirez FG, Ruiz-Corral JA, Rodríguez-Moreno VM, Soria-Ruiz J, Mora-Orozco CD (2020) Efecto del calentamiento global sobre la producción de alfalfa en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 11: 34-48.
- Pandey P, De N (2017) Effect of chitosan based superabsorbent on water retention behaviour of soil and seedling growth of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Indian Journal of Ecology* 44: 456-460.
- Parsana Y, Yadav M, Kumar S (2023) Microencapsulation in the chitosan-coated alginate-inulin matrix of *Limosilactobacillus reuteri* SW23 and *Lactobacillus salivarius* RBL50 and their characterization. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 5: 100285. DOI: 10.1016/j.carpta.2023.100285.
- Parvathy PC, Jyothi AN (2012) Synthesis, characterization and swelling behaviour of superabsorbent polymers from cassava starch-graft-poly(acrylamide). *Starch/Starke* 64: 207-218.
- Pathak VM, Kumar N (2017) Dataset on the superabsorbent hydrogel synthesis with SiO₂ nanoparticle and role in water restoration capability of agriculture soil. *Data in Brief* 13: 291-294.
- Pereira R, Mendes A, Bártolo P (2013) Alginate/aloë vera hydrogel films for biomedical applications. *Procedia CIRP* 5: 210-215.
- Rivera-Fernández RD, Mora Mueckay C, Moreira-Salto JR, Mendoza-Intriago DA (2021) Volumen de humedecimiento por la aplicación de hidrogel en suelos de diferentes texturas. *Revista de Ciencias de la Vida* 33(1): 6775. DOI: 10.17163/lgr.n33.2021.06.
- Rizwan M, Gilani S, Durani A, Naseem S (2021) Materials diversity of hydrogel: Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field. *Journal of Advanced Research* 33: 15-40.
- Rychter P, Rogacz D, Lewicka K, Kollár J, Kawalec M, Mosnálek J (2019) Ecotoxicological properties of tulipalin a-based superabsorbents versus conventional superabsorbent hydrogels. *Hindawi. Advances in Polymer Technology* 2019: 1-15. DOI: 10.1155/2019/2947152.
- Saruchi, Vaneet K, Hemant M, Saeed M, Alhassan (2019) Biodegradable hydrogels of tragacanth gum polysaccharide to improve water retention capacity of soil and environment-friendly controlled release of agrochemicals. *International Journal of Biological Macromolecules* 132: 1252-1261.
- Shin Jinsub, Braun Paul V, Lee Wonmok (2010) Fast response photonic crystal pH sensor based on templated photo-polymerized hydrogel inverse opal. *Sensors and Actuators B: Chemical* 150: 183-90.
- Skrzypczak D, Mikula K, Witek A (2019) Hydrogel capsules with alfalfa as micronutrients Carrier. *SN Applied Sciences* 1: 573. DOI: 10.1007/s42452-019-0575-4.

Song B, Liang H, Sun R, Peng P, Jiang Y, She D (2020) Hydrogel synthesis based on lignin/sodium alginate and application in agriculture. *International Journal of Biological Macromolecules* 144: 219-230.

Tomadoni B, Casalengué C, Alvarez VA (2019) Biopolymer-based hydrogels for agriculture applications: Swelling behavior and slow release of agrochemicals. In: Gutiérrez T (eds) *Polymers for agri-food applications*. Springer. UK. pp: 99-125.