



# Síntesis de derivados de celulosa obtenidos de especies invasoras para su utilización como mejoradores de suelo

Synthesis of cellulose derivatives obtained from invasive species for their use as soil improvers

Johali Estefanía Páez Montes<sup>1</sup> , Sofía Arlette Hoffmann Portilla<sup>1</sup> , Daniel Rojas Solís<sup>2</sup> , Roberto Lindig Cisneros<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Antigua Carretera Pátzcuaro No. 8701, Morelia, Michoacán, México. C. P. 58190.

## Historial

Manuscrito recibido: 10 de febrero de 2025

Manuscrito aceptado: 27 de junio de 2025

Manuscrito publicado: agosto 2025

## \*Autor para correspondencia

Roberto Lindig-Cisneros

[rlindig@iies.unam.mx](mailto:rlindig@iies.unam.mx)

ORCID: 0000-0003-2542-7038

## Resumen

La búsqueda de materiales alternativos para mejorar la calidad y propiedades del suelo es una necesidad urgente dado el nivel de degradación edáfica que existe a nivel mundial. En este trabajo se realizó la síntesis de carboximetilcelulosa, hidrogeles de carboximetilcelulosa y fibras de rayón derivados de celulosa extraída de dos especies invasoras, *Typha* spp. y *Phragmites australis*. El rendimiento de la celulosa obtenida de la biomasa de las especies invasoras fue en promedio 56%, de carboximetilcelulosa 95.5%, y por cada gramo de ésta se obtuvieron 3.4 g de hidrogel. La obtención de rayón fue más variable, alcanzando mejores resultados con celulosa de *P. australis* con carboximetilcelulosa (99%). Se corroboró la naturaleza química de los productos de síntesis por medio de espectros de infrarrojo. Para analizar efectos en microorganismos del suelo se hicieron ensayos con *Pseudomonas putida* TL36, una bacteria promotora del crecimiento vegetal, indicando que los polímeros son inocuos para la bacteria. Nuestros resultados indican que es factible obtener polímeros potencialmente útiles para la recuperación de suelos degradados a partir de celulosa de especies vegetales invasoras.

**Palabras clave:** hidrogeles, fibras de rayón, carboximetilcelulosa, especies invasoras, microorganismos.

## Introducción

En la actualidad, los problemas derivados de la crisis ambiental, cuyas manifestaciones incluyen el cambio climático, pérdida de biodiversidad y degradación de suelos, obligan a proponer diversas alternativas para mitigar los daños que escalan día con día. Con el

## Abstract

The search for alternative materials to improve soil quality and properties is an urgent necessity given the level of soil degradation that exists worldwide. In this work, the synthesis of carboxymethylcellulose, carboxymethylcellulose hydrogels, and rayon fibers derived from cellulose extracted from two invasive species, *Typha* spp. and *Phragmites australis*, was carried out. The yield of cellulose obtained from the biomass of the invasive species was on average 56%, of carboxymethylcellulose 95.5%, and for every gram of this latter, 3.4 g of hydrogel was obtained. The extraction of rayon was more variable, achieving better results with cellulose from *P. australis* with carboxymethylcellulose (99%). The chemical nature of the synthesis products was confirmed through infrared spectra. To analyze effects on soil microorganisms, tests were performed with *Pseudomonas putida* TL36, a plant growth-promoting bacterium, indicating that the polymers are harmless to the bacteria. Our results indicate that it is feasible to obtain potentially useful polymers for the restoration of degraded soils from cellulose of invasive plant species.

**Keywords:** hydrogels, rayon fibers, carboxymethylcellulose, invasive species, microorganisms.

crecimiento poblacional y las actividades antrópicas que provocan alteraciones en los ecosistemas y un menor acceso a recursos, se refleja de manera clara un mayor requerimiento de alimentos y agua; al mismo tiempo, se puede advertir una preocupación por la calidad de estos bienes. Es bien sabido que la producción de alimentos

depende de la agricultura; sin embargo, la gestión inadecuada del suelo y el agua trae como consecuencias la erosión, la escasez de agua y el agotamiento de los suelos (Bauli *et al.*, 2021; Li y Chen, 2020).

Con el propósito de contribuir a superar estos problemas ambientales, se han establecido distintas líneas de investigación enfocadas en materiales y procesos que ayuden a encontrar soluciones, considerando los posibles impactos ambientales benéficos que justifican su implementación, gestión y distribución (Bauli *et al.*, 2021). Así, se ha planteado el desarrollo de materiales mejoradores de suelos degradados, en particular los que incrementan la capacidad de retención de agua, de origen natural o sintético (Śpitalniak *et al.*, 2021). Entre los segundos destacan compuestos químicos con la capacidad de absorber agua como son los hidrogeles (Miller y Naeth, 2019).

En la búsqueda de una opción más segura y amigable con el medio ambiente para este tipo de materiales, se han estudiado los biopolímeros para sustituir a los materiales sintéticos, considerando las fuentes de obtención, el bajo costo, la disponibilidad y la biodegradabilidad. Algunos reportes recientes han demostrado un gran potencial de biopolímeros mejoradores del suelo, como los hidrogeles o fibras de celulosa, que absorben agua, y podrían ofrecer soluciones innovadoras (Zheng *et al.*, 2023, Ngo *et al.*, 2024, Jaramillo-Quiceno *et al.*, 2024). Además, la investigación sobre hidrogeles muestra resultados prometedores para reducir los impactos ambientales de la lixiviación y pérdida de nutrientes, sobre todo en el ámbito agrícola (Ngo *et al.*, 2024).

La celulosa es un polímero muy abundante en la naturaleza, además de su biodegradabilidad en el medio, no es dañina para organismos presentes en el suelo. Históricamente, se ha obtenido sobre todo de especies arbóreas, pero cabe mencionar que la mayoría de los desechos agrícolas son ricos en celulosa (Li y Chen, 2020), y una fuente potencial son las especies vegetales invasoras.

En general, se considera a una especie como invasora cuando se le ha introducido en sitios fuera de sus áreas de distribución natural, que desplaza a las especies nativas y altera el funcionamiento de los ecosistemas (Pysek *et al.*, 2004), aunque también especies nativas pueden mostrar este comportamiento ante alteraciones antrópicas de los ecosistemas. La proliferación de especies invasoras es la segunda causa de pérdida de la biodiversidad en el planeta (Vitousek y Field, 1999), siendo los humedales particularmente susceptibles (Zedler y Kercher, 2010). Por ejemplo, los tules (*Typha* spp.), que son plantas características de humedales,

pueden mostrar un comportamiento invasivo como respuesta a alteraciones ambientales antropogénicas (Shih y Finkelstein, 2008). El carrizo (*Phragmites australis*), también es considerada una especie invasora, en el caso de México su presencia es abundante en los estados de Chihuahua, Jalisco y Michoacán. Esta especie provoca un desplazamiento de las especies nativas y una degradación de la vida silvestre (Swearingen y Saltonstall, 2010). El manantial de la Mintzita en Morelia, Michoacán, ilustra el problema que representan las especies invasoras, con datos del año 2021 se calculó que *P. australis* cubría al menos el 17.5% del área del humedal (Fuentes-Gutiérrez y Lindig-Cisneros, 2023).

Por otro lado, para los procesos biogeoquímicos del suelo y el crecimiento de las plantas son de gran importancia las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV). Las BPCV benefician el crecimiento y desarrollo de las plantas, su efecto positivo se debe a su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno y fósforo, y para sintetizar hormonas vegetales, como el ácido indolacético y las giberelinas. Entre las BPCV más utilizadas se encuentran especies del género *Pseudomonas*. Estas bacterias tienen una gran versatilidad metabólica y plasticidad genética ya que habitan en diferentes ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos (Sánchez Carrillo y Guerra Ramírez, 2022).

La síntesis de materiales a base de celulosa se ha estudiado con anterioridad teniendo diversas fuentes de materia prima. En este trabajo se utilizó celulosa de especies invasoras para elaborar materiales tendientes a recuperar suelos degradados y mejorar la retención de agua. El objetivo fue probar la viabilidad de elaborar carboximetilcelulosa, hidrogeles de carboximetilcelulosa y fibras de rayón, todos materiales con potencial como mejoradores del suelo y para aumentar la retención de agua, a partir de celulosa extraída de las partes aéreas de *Typha* spp. y *P. australis*, así como evaluar su inocuidad en ensayos in vitro con una bacteria promotora del crecimiento vegetal.

## Materiales y métodos

La biomasa de tule y carrizo fue recolectada en el Manantial de la Mintzita (Morelia, Michoacán) y en los humedales del Lago de Cuitzeo (Michoacán). El material fue secado en un horno y procesado en un molino Thomas Scientific Modelo3383-L10 con una criba del número 40, para la obtención de celulosa. Para ello, se empleó el método propuesto por Brendel *et al.* (2000) y Abdulhameed *et al.* (2020) como se describe a

continuación:

El material seco y molido (5 g) de cada una de las especies se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, al que se añadieron 10 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 70% y 100 mL de ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) al 80%. El matraz se trasladó a una parrilla de calentamiento con agitación en una campana de extracción, se ajustó la velocidad a 200 rpm y se aumentó la temperatura progresivamente, en un periodo de tiempo de 1 hora, hasta llegar a 120 °C. La mezcla se dejó enfriar y se agregaron 60 mL de agua destilada y 30 mL de etanol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) al 95% para realizar un lavado. Finalmente, la celulosa obtenida, se filtró y secó en un horno a 35 °C por 12 h y se procesó en un molino.

### Síntesis de carboximetilcelulosa (CMC)

El proceso para la obtención de CMC a escala laboratorio fue modificado de Terán y Escalera (2007) como se describe a continuación:

**Etapas de inchamiento.** Se pesaron 15 g de celulosa molida y se agregaron a un vaso de precipitados de 500 mL. Se añadieron 200 mL de isopropanol y se agitó a 150 rpm durante 15 minutos, y 30.3 mL de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) diluido al 30% con isopropanol. Se agitó a 250-300 rpm, por espacio de una hora. Es importante destacar que la temperatura en esta etapa del proceso debe mantenerse en un rango de 10 a 12 °C para la obtención exitosa de la CMC.

**Etapas de eterificación.** Se agregó la misma cantidad de disolución de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) a la celulosa hinchada. Se preparó una disolución de ácido monocloroacético mezclando 13.3 g del reactivo con 49 mL de isopropanol en una concentración al 87% y se adicionó a la celulosa. Posteriormente, se aumentó la temperatura hasta los 60 °C y se agitó por 3 horas. Se decantó el sólido y se adicionaron 200 mL de isopropanol al 87%, se agitó a 200 rpm por 10 minutos, se dejó reposar por 10 minutos y se decantó nuevamente.

**Neutralización y purificación.** Se neutralizó el sólido filtrado con 3 mL de ácido acético glacial. Se realizaron 2 lavados con etanol al 80% siguiendo el mismo procedimiento del primer lavado, descrito en la etapa anterior. Se realizó el último lavado con etanol al 90%. En este lavado final, el producto se filtró con un matraz Kitasato, un embudo de Büchner, papel filtro y una bomba de vacío, y se dejó secar.

### Síntesis de hidrogeles

Se utilizaron dos métodos para la síntesis de hidrogeles, en el primero se disolvieron 2 g de CMC en 20 mL de agua destilada. Se mantuvo en agitación a 250 rpm durante

una hora a 80 °C. Posteriormente, se añadieron 10 mL de etilenglicol, manteniendo las condiciones de agitación y temperatura durante 2 horas hasta la formación del hidrogel. En el segundo método se disolvió la CMC en 16 mL de agua destilada con agitación constante. Después se añadieron 10 mL de etilenglicol y se llevó al microondas durante 5 minutos con una potencia de 600 W.

### Síntesis de fibras de rayón

Se mezclaron 4.25 g de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) con 14 mL de agua. Se calentó ligeramente y se agitó a 200 rpm hasta su disolución. Se añadió gota a gota y con una agitación de 250 rpm, 1.5 mL de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) con una concentración al 30%. De esta reacción se formó un precipitado con tono azul pálido de hidróxido de cobre ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ). Se filtró el sólido a través del embudo Büchner y se lavó con 10 mL de agua. En 15 mL de amoníaco concentrado se disolvió el hidróxido de cobre ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) obtenido anteriormente. Sobre esta disolución se añadió, agitando constantemente a 300 rpm, 12 g de celulosa o hasta que adquiriera un aspecto viscoso. Se agregó una solución de 50 mL de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) al 5% y se agitó. Se realizaron los lavados correspondientes (aproximadamente 10) con solución de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) hasta que el residuo no presentara un color verde-azul y se filtró. Para la síntesis del material híbrido de celulosa con CMC se repitió el proceso anterior, adicionando 6 g de celulosa y 6 g de CMC o hasta obtener un aspecto viscoso.

### Obtención de espectros de infrarrojo

En el Laboratorio de Análisis Térmico y de Infrarrojo, del Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, de la Universidad Nacional Autónoma de México, los espectros de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) fueron recopilados mediante la técnica de reflectancia total atenuada (ATR-FTIR) empleando un espectrómetro FTIR Nicolet iS10 de Thermo Scientific equipado con un accesorio de muestreo ATR Thermo Scientific Smart iTR™ con un cristal de diamante. Los datos fueron recopilados por una computadora adjunta que ejecuta el software OMNIC. Las muestras sólidas se adicionaron directamente al cristal para su análisis a temperatura ambiente sin aplicar presión. Se obtuvieron y coadicionaron 32 espectros para cada muestra cubriendo un rango de 4000–650  $\text{cm}^{-1}$  a una resolución espectral de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Se obtuvo un espectro de fondo recolectando 32 escaneos coadicionados y posteriormente se efectuó la limpieza del cristal de diamante con acetona.

### Pruebas de crecimiento bacteriano

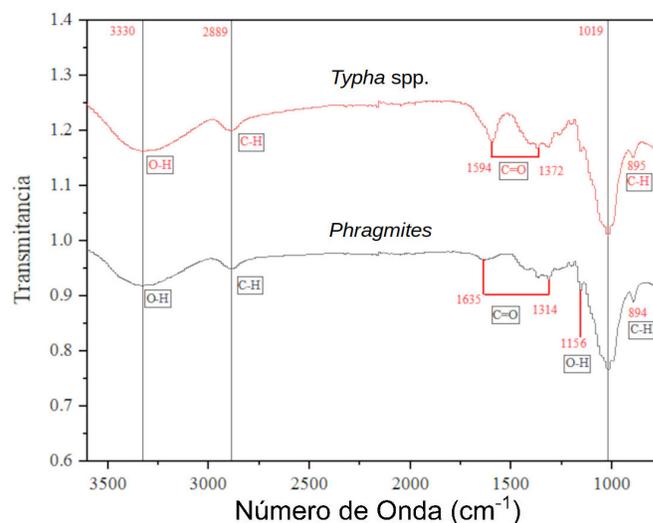
Se realizaron pruebas de confrontación en cajas de Petri de plástico con agar nutritivo (BD Bioxon, Becto Dickinson de México; peptona 5 gr/L, extracto de carne 3 gr/L, agar 15 gr/L) se inoculó a la bacteria *Pseudomonas putida* TL36 y se puso en interacción con los materiales sintetizados. En el caso del hidrogel la interacción llevó a cabo durante 48 h en incubadora a 30-35 °C. Para las fibras de rayón se mantuvieron las mismas condiciones de temperatura de la incubadora, pero el tiempo de interacción fue de 72 h. Se tomó registro diario de la evolución en el crecimiento de las colonias de bacterias con el fin de detectar si se formaba un halo de inhibición alrededor del material. Para determinar la compatibilidad al finalizar los ensayos, se recuperó 1 cm<sup>2</sup> de cada caja y se realizaron diluciones para determinar la cantidad de unidades formadoras de colonia (UFC) presentes en cada tratamiento. Se contó con tres réplicas de cada tratamiento y del control y se hicieron análisis de varianza usando como variable al número de UFC.

Se llevaron a cabo pruebas de cinética bacteriana con fibras de rayón y fibras de rayón con CMC para evaluar el crecimiento bacteriano en presencia de los materiales, esto porque en la síntesis del rayón se utilizó sulfato de cobre que se ha demostrado que en concentraciones altas genera una fase lag en cepas de *P. putida* (Chen *et al.*, 2006). *P. putida* TL36 se creció en caldo nutritivo (BD Bioxon, Becto Dickinson de México; peptona 5 gr/L, extracto de carne 3 gr/L). El crecimiento se midió a una densidad óptica (DO) de 590 nm y se determinó a partir de una DO = 0,1. Al caldo nutritivo se agregaron el 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1.0% y 2.0% de rayón a cada uno de los tratamientos correspondientes. Se realizaron mediciones cada 2, 4, 6, 8, 12, 24, 48 y 72 horas en un espectrofotómetro UV-Vis (GENESYS 20).

## Resultados y discusión

### Extracción de celulosa y síntesis de carboximetilcelulosa

El rendimiento de la celulosa aislada de hojas de *Typha* spp. fue del 54% y en el caso de *P. australis* fue de 58%. Los espectros de FTIR del material obtenido corroboran que se trata de celulosa (**Figura 1**), en donde se pueden apreciar las bandas principales característicos de este compuesto en las cercanías de 3330 cm<sup>-1</sup> que correspondiente a enlaces O-H (Heller *et al.*, 2015), 2900 cm<sup>-1</sup> correspondiente al estiramiento de enlaces C-H (Calderón *et al.*, 2013), 1370 cm<sup>-1</sup> que corresponde a flexión de enlaces C-H (El-Sakhawy *et al.*, 2018), 1017 cm<sup>-1</sup> (esti-



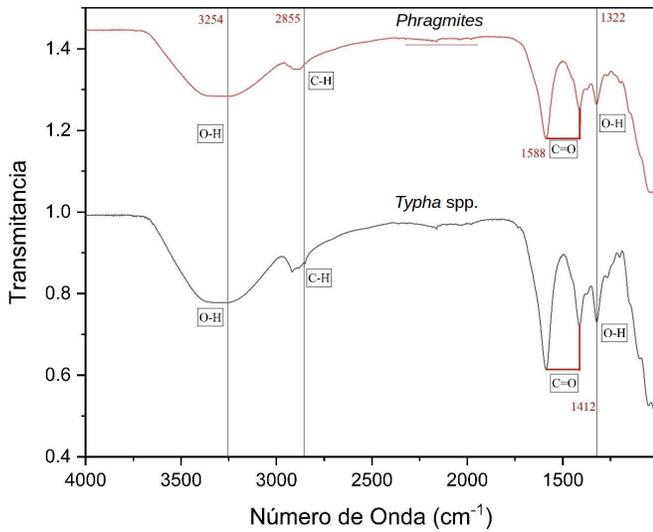
**Figura 1.** Espectros de FTIR de celulosa extraída de las dos especies invasoras, se pueden apreciar las bandas características de este polímero natural.

ramiento C-O en celulosa, hemicelulosa y lignina) y 885 cm<sup>-1</sup> a 895 cm<sup>-1</sup> que corresponde a enlaces beta-glucosídicos entre unidades de glucosa (Adebajo y Frost, 2004; Viera *et al.*, 2007). Cabe mencionar que las señales en la cercanía de 1635 cm<sup>-1</sup> (*Phragmites*) y 1594 cm<sup>-1</sup> (*Typha*) se pueden deber a deformación de agua absorbida o en el caso de *Phragmites*, que contiene lignina en sus tejidos, a vibraciones de enlaces C=O de grupos carbonilo de residuos de lignina. Además, en ~1156 cm<sup>-1</sup> (*Phragmites*) y ~1019 cm<sup>-1</sup> (*Typha*), las cuales son relacionadas a estiramiento asimétrico C-O-C (puente de oxígeno en éteres) y vibraciones de anillo en polisacáridos. Estas bandas sugieren que la celulosa extraída contenía algunas impurezas.

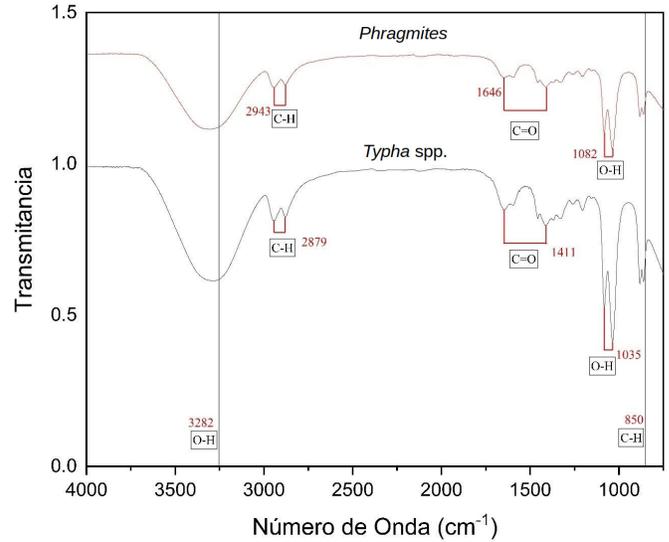
La síntesis de CMC se logró a partir de celulosa de ambas especies con un rendimiento de 93% para *Typha* spp. y de 98% para *P. australis*. Los espectros de FTIR de carboximetilcelulosa (**Figura 2**) se caracterizan por: bandas en 1412.47 cm<sup>-1</sup> (*Typha* spp.) y en 1412.73 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*), que corresponden a los grupos carboxilo (Adinugraha *et al.*, 2005), o a la vibración de estiramiento simétrico y asimétrico del COO (El-Sakhawy *et al.*, 2018); en 1322.22 cm<sup>-1</sup> (*Typha* spp.) y 1322.92 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*) que corresponde a la vibración de flexión de O-H (Mondal *et al.*, 2015); en 1587.91 cm<sup>-1</sup> (*Typha* spp.) y 1588.44 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*), que corresponde al estiramiento en el grupo carboxilato (Calderón *et al.*, 2013) y una banda ancha en 3281.63 cm<sup>-1</sup> y 3254.70 cm<sup>-1</sup> debida a grupos hidroxilo (Heller *et al.*, 2015).

### Hidrogeles y fibras de rayón

De los dos métodos de síntesis utilizados, el segundo re-



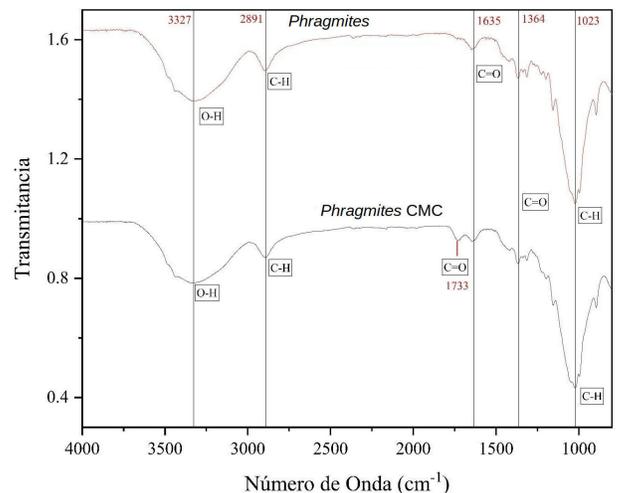
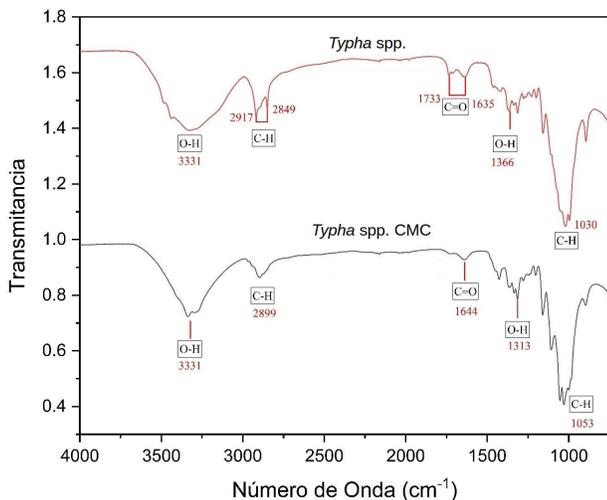
**Figura 2.** Espectros de FTIR de carboximetilcelulosa sintetizada a partir de celulosa extraída de las dos especies invasoras, se pueden apreciar las bandas características de este compuesto.



**Figura 3.** Comparación de FTIR de hidrogeles obtenidos a partir de carboximetilcelulosa de ambas especies invasoras.

sultó mejor debido a que fue más consistente en el rendimiento, además de requerir menor cantidad de agua y tiempo de preparación. En el caso del carrizo, se obtuvieron en promedio 3.6 g de hidrogel por cada gramo de CMC. Para el tule fueron 3.2 g de hidrogel por gramo de CMC. Los espectros de FTIR (**Figura 3**) muestran bandas en 3282.2 cm<sup>-1</sup> (*Typha spp.*) y 3282.23 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*) que es una banda ancha resultante de grupos hidroxilo (Heller *et al.*, 2015); en 2879.65 cm<sup>-1</sup> (*Typha spp.*) y 2879.32 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*) que corresponde al estiramiento en grupos C-H (Calderón *et al.*, 2013); en 1649.52 cm<sup>-1</sup> (*Typha spp.*) y 1646.51 cm<sup>-1</sup> (*P. australis*) que corresponden a la vibración simétrica de enlaces C-H.

La síntesis de rayón fue satisfactoria con celulosa obtenida de ambas especies invasoras con y sin CMC. El mejor rendimiento fue para el rayón elaborado con celulosa de *P. australis* con CMC (99%), seguido de rayón con celulosa de la misma especie sin CMC (82%); después el rayón elaborado con celulosa de *Typha spp.* sin CMC (73%) y finalmente rayón elaborado con celulosa de *Typha spp.* con CMC (46%). Los análisis de infrarrojo para los dos tipos de rayón elaborados con celulosa de *Typha spp.* y para los elaborados con *P. australis* se muestran en la **Figura 4**, la correspondencia de cada banda de los espectros se presenta en la **Tabla 1** de acuerdo con Gorade *et al.* (2022).



**Figura 4.** Comparación de FTIR de las fibras de rayón elaboradas con celulosa de *Typha spp.* (izquierda) y *Phragmites australis* (derecha) con y sin CMC.

**Tabla 1.** Correspondencia de las bandas de los espectros de FTIR para las fibras de rayón de acuerdo con Gorade *et al.* (2022).

Fuente de celulosa	CMC (%)	Banda (cm <sup>-1</sup> )	Observaciones
<i>Typha</i> spp.	0	3331.57	Vibración del estiramiento O-H
<i>Typha</i> spp.	0	2917.50	Vibraciones del estiramiento C-H
<i>Typha</i> spp.	50	3335.25	Vibración del estiramiento O-H
<i>Typha</i> spp.	50	2899.21	
<i>P. australis</i>	0	3332.45	Vibración del estiramiento O-H
<i>P. australis</i>	0	2891.66	Vibraciones del estiramiento C-H
<i>P. australis</i>	50	3337.64	Vibración del estiramiento O-H
<i>P. australis</i>	50	2891.71	Vibraciones del estiramiento C-H

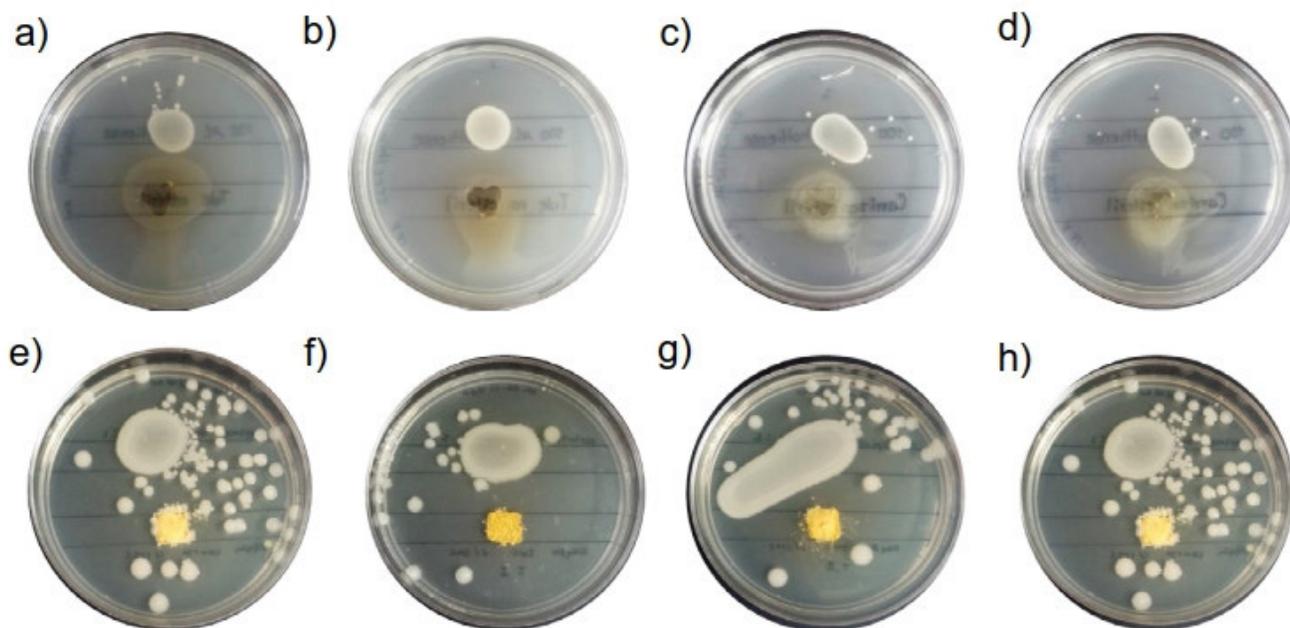
**Ensayos de confrontación y cinética bacteriana**

Los ensayos de confrontación demuestran que, las bacterias confrontadas con el hidrogel no presentan un halo de inhibición como se puede apreciar en la **Figura 5**. En el caso del rayón, en la misma figura se observa la evaluación de la interacción al tiempo final (72 horas).

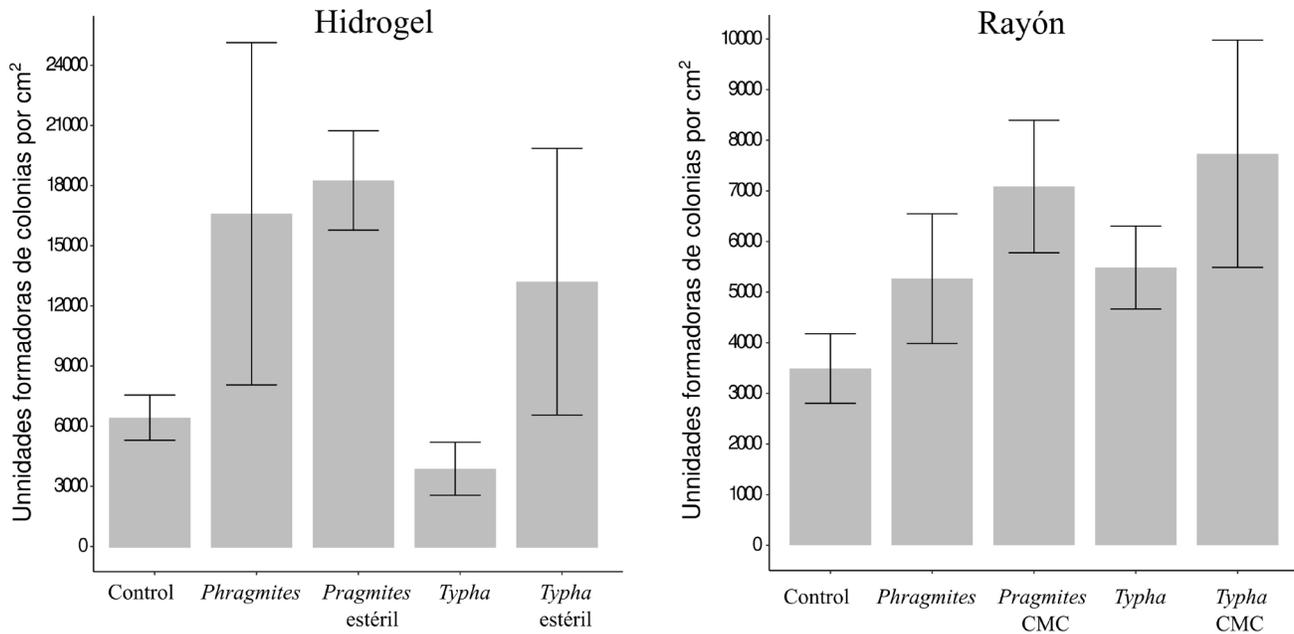
En el inciso e) correspondiente al tratamiento de rayón de tule sin CMS, se observa que no hubo inhibición en el crecimiento bacteriano, inclusive podemos observar colonias que lograron crecer sobre el rayón. En el inciso f) que corresponde al tratamiento del rayón de tule más CMS no logra observarse propiamente un halo de inhibición, aunque las colonias bacterianas ya no crecen de forma tan cercana al rayón. En el tratamiento de rayón de carrizo sin CMS que se representa en el inciso g), tampoco logra observarse un efecto notorio de inhibición. Finalmente, el tratamiento de rayón de carrizo con CMS no muestra efecto alguno sobre el crecimiento bacteriano, inclusive pareciera ser que *P. putida* TL36 la toma como sustrato para crecer.

Para cuantificar el efecto de los hidrogeles y el rayón en el crecimiento de *P. putida* TL36, se procedió al conteo de UFC. Los resultados indican que no hay inhibición derivada de la presencia de hidrogel pues las medias no son estadísticamente diferentes entre sí de acuerdo a los análisis de varianza (**Figura 6**)

En los ensayos de cinética bacteriana (**Figura 7**), se puede apreciar que con excepción del ensayo correspondiente al rayón elaborado con celulosa de *Typha* spp. con CMC, en el resto de los tratamientos se presentó una fase lag para la concentración más alta de rayón (2%), sin embargo, al final el microorganismo logró adaptarse y llegar a la misma concentración que para el resto de



**Figura 5.** Imágenes representativas de los ensayos de confrontación de *P. putida* TL35 con los polímeros. a) tule estéril, b) tule no estéril, c) carrizo estéril, d) carrizo no estéril, e) rayón de tule sin CMS, f) rayón de tule con CMS, g) rayón de carrizo sin CMS y h) rayón de carrizo con CMS.



**Figura 6.** Unidades formadoras de colonias para cada uno de los productos obtenidos a partir de celulosa de especies invasoras, en ningún caso se detectó inhibición.

los tratamientos ( $\approx 1.2$  *Thypha* spp. y  $\approx 1.5$  *P. australis*). Hay que recordar que para la síntesis de rayón se utiliza sulfato de cobre, los iones de cobre producen especies reactivas de oxígeno que rompen la pared celular de los microorganismos, por lo que las bacterias para poder crecer deben activar mecanismos de detoxificación o adaptación lo que retrasa su crecimiento generando una fase de adaptación (Fowler *et al.*, 2019).

## Conclusiones

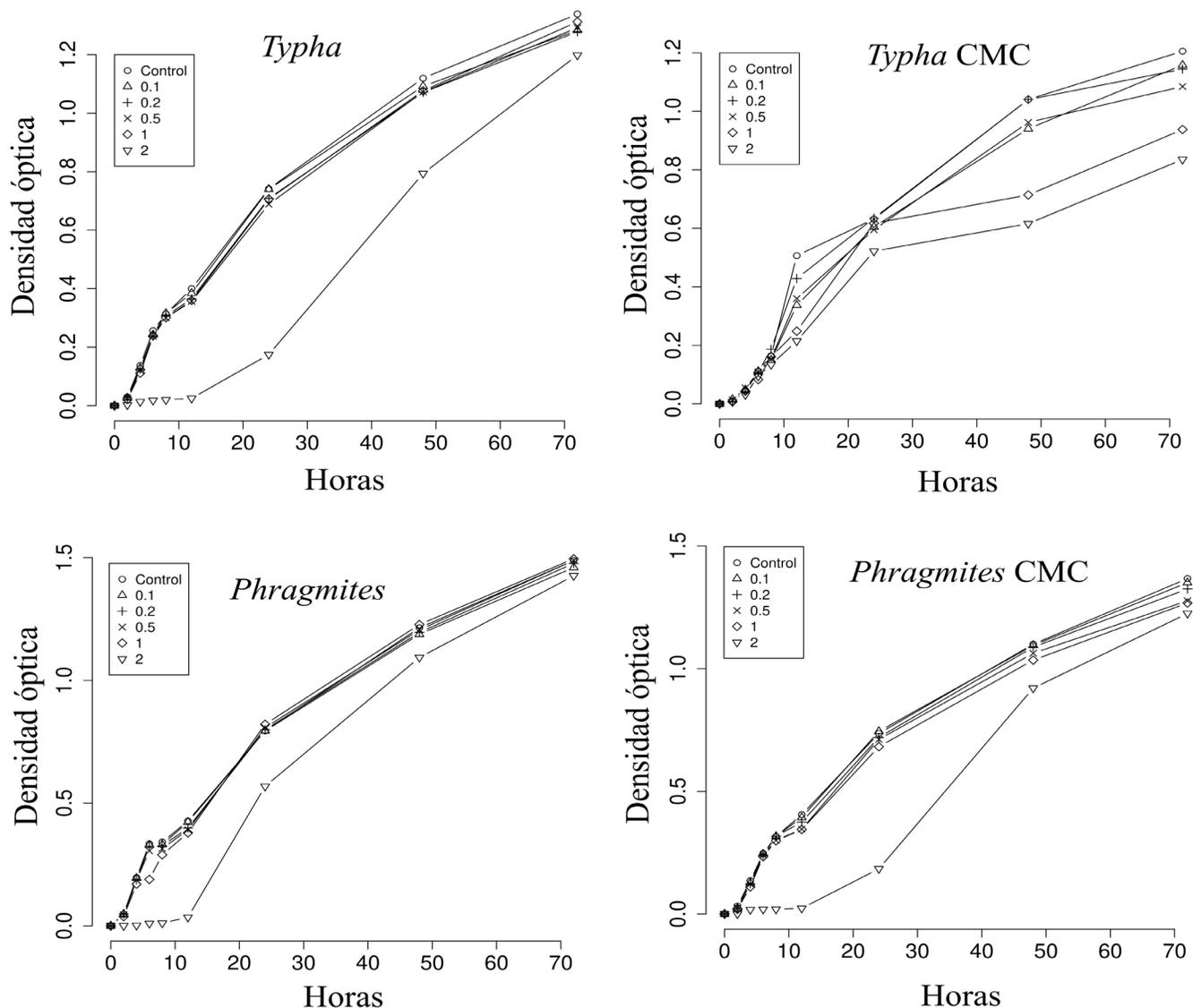
El objetivo principal de esta investigación fue indagar sobre el potencial de la celulosa de *Typha* spp. y *P. australis* para sintetizar carboximetilcelulosa, hidrogeles, fibras de rayón y fibras de rayón con carboximetilcelulosa, por su potencial como materiales mejoradores de suelos degradados. Respecto a la extracción de celulosa y síntesis de carboximetilcelulosa, la especie que dio mejores resultados, en términos de rendimiento, fue *P. australis* con resultados de 58% para la celulosa y 98% para la carboximetilcelulosa. En relación con los hidrogeles, el mejor rendimiento también se obtuvo con la celulosa de *P. australis*, con la que se obtuvo en promedio 3.6 g de masa total del hidrogel por cada gramo de CMC. Se sintetizaron cuatro materiales de fibras de rayón, de los cuales el mejor, en términos de rendimiento de todo el proceso fue la muestra de fibras de rayón de *P. australis* con carboximetilcelulosa. Los materiales no mostraron efectos inhibitorios sobre *Pseudomonas*

*putida* TL36, lo cual sugiere un comportamiento inocuo, esto es importante debido al papel fundamental de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en los procesos del suelo. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para evaluar su compatibilidad ecológica y funcionalidad microbiana.

Los compuestos, sintetizados en el presente trabajo a partir de especies invasoras de dos géneros que no habían sido utilizados con este fin, han mostrado su efectividad como mejoradores del suelo como lo indican estudios previos, tanto por sus propiedades de absorción de agua y como vehículos para la aplicación de fertilizantes (Skrzypczak *et al.*, 2023; Durpekova *et al.*, 2021). Finalmente, para la síntesis de las fibras de rayón sería recomendable explorar rutas que no dependan de compuestos de cobre por su toxicidad potencial.

## Referencias

- Abdulhameed A, Mbuvi HM, Changamu EO (2020). Synthesis of cellulose-based superabsorbent hydrogel from rice husk using a microwave. *American Journal of Materials Science* 10:1-8. doi:10.5923/j.materials.20201001.01.
- Adebajo MO, Frost RL (2004). Infrared and  $^{13}\text{C}$  MAS nuclear magnetic resonance spectroscopic study of acetylation of cotton. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 60:449-453. doi:10.1016/S1386-1425(03)00249-X.
- Adinugraha MP, Marseno DW, Haryadi (2005). Synthesis and characterization of sodium carboxymethylcellulose from cavendish



**Figura 7.** Resultados de los ensayos de cinética bacteriana en presencia de fibras de rayón elaboradas con celulosa de ambas especies invasoras y con adición o no de CMC. La densidad óptica fue determinada a 590 nm.

banana pseudo stem (*Musa cavendishii* LAMBERT). *Carbohydrate Polymers*. 62:164-169. doi:10.1016/J.CARBPOL.2005.07.019.

Bauli CR, Lima GF, de Souza AG, Ferreira RR, Rosa DS (2021). Eco-friendly carboxymethyl cellulose hydrogels filled with nanocellulose or nanoclays for agriculture applications as soil conditioning and nutrient carrier and their impact on cucumber growing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 623:126771. doi:10.1016/j.colsurfa.2021.126771.

Brendel O, Iannetta PPM, Stewart D (2000). A rapid and simple method to isolate pure alpha-cellulose. *Phytochemical Analysis*. 11: 7-10. doi:10.1002/(SICI)1099-1565(200001/02)11:13.0.CO;2-U.

Calderón F, Haddix M, Conant R, Magrini-Bair K, Paul E (2013). Diffuse-reflectance Fourier-transform mid-infrared spectroscopy as a method of characterizing changes in soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 77:1591-1600. doi:10.2136/

SSSAJ2013.04.0131.

Chen X, Shi J, Chen Y, Xu X, Xu S, Wang Y (2006). Tolerance and biosorption of copper and zinc by *Pseudomonas putida* CZ1 isolated from metal-polluted soil. *Canadian Journal of Microbiology*. 52(4):308-316. doi:10.1139/w05-157. PMID: 16699581.

Durpekova S, Di Martino A, Dusankova M, Drohsler P, Sedlarik V. (2021). Biopolymer hydrogel based on acid whey and cellulose derivatives for enhancement water retention capacity of soil and slow release of fertilizers. *Polymers* 13(19):3274. doi:10.3390/polym13193274.

El-Sakhawy M, Kamel S, Salama A, Tohamy HAS (2018). Preparation and infrared study of cellulose and amphiphilic materials. *Cellulose Chemistry and Technology*. 52:193-200.

Fowler L, Engqvist H, Öhman-Mägi C (2019). Effect of copper

- ion concentration on bacteria and cells. *Materials*. 12(22), 3798. doi:10.3390/ma12223798.
- Fuentes-Gutiérrez E, Lindig-Cisneros R (2023). Biocultural, productive, and ecocentric restoration in La Mintzita spring-fed wetland, Michoacán, México. *Ecological Restoration*. 41:44-54. doi:10.3368/er.41.1.44.
- Grade V, Chaudhary B, Parmaj O, Kale R (2022). Preparation and characterization of chi- tosan/viscose rayon filament biocomposite. *Journal of Natural Fibers*. 19:1189-1200. doi:10.1080/15440478.2020.1764442
- Heller C, Ellerbrock RH, Roßkopf N, Klungenfuß C, Zeitz J (2015). Soil organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR-spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity. *European Journal of Soil Science*. 66:847-858. doi:10.1111/EJSS.12279
- Jaramillo-Quiceno N, Carmona ASD, Serna JS, Carmona DM, Torres-Taborda M, Hincapié-Llanos GA, Marín JFS, Álvarez-López C (2024). Enhancing soil water retention and plant growth with thermal crosslinked silk sericin-based hydrogel. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 12:112260. doi:10.1016/J.JECE.2024.112260.
- Li S, Chen G (2020). Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: Preparation, performance, and socioeconomic impacts. *Journal of Cleaner Production*. 251:119669. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.119669.
- Miller VS, Naeth MA (2019). Hydrogel and organic amendments to increase water retention in anthroposols for land reclamation. *Applied and Environmental Soil Science*. 4768091. doi:10.1155/2019/4768091
- Mondal MIH, Yeasmin MS, Rahman MS (2015). Preparation of food grade carboxymethyl cellulose from corn husk agrowaste. *International Journal of Biological Macromolecules*. 79:144-150. doi:10.1016/J.IJBIOMAC.2015.04.061.
- Ngo AT, Mori Y, Bui LT (2024). Effects of cellulose nanofibers on soil water retention and aggregate stability. *Environmental Technology and Innovation*. 35:103650. doi: 10.1016/J.ETI.2024.103650.
- Pysek P, Richardson D, Rejmanek M, Webster G, Williamson M, Kirschner J (2004). Alien plants in checklists and floras: towards better communication between taxonomists and ecologists. *Taxon*. 53:131-143. doi:10.2307/4135498.
- Sánchez Carrillo R, Guerra Ramírez P (2022). *Pseudomonas* spp. benéficas en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4):715-725. doi:10.29312/remexca.v13i4.2799.
- Shih JG, Finkelstein SA (2008). Range dynamics and invasive tendencies in *Typha latifolia* and *Typha angustifolia* in eastern North America derived from herbarium and pollen records. *Wetlands*. 28:1-16. doi:10.1672/07-40.1
- Skrzypczak D, Izydoreczyk G, Taf R, Moustakas K, Chojnacka K (2023). Cellulose-based fertilizers for sustainable agriculture: Effective methods for increasing crop yield and soil health. *Industrial Crops and Products* 205:117500. doi:10.1016/j.indcrop.2023.117500.
- Swearingen J, Saltonstall K (2010). *Phragmites* field guide: distinguishing native and exotic forms of common reed (*Phragmites australis*) in the United States. *Plant Conservation Alliance, Weeds Gone Wild*. <http://www.nps.gov/plants/alien/pubs/index.htm>.
- Śpitalniak M, Bogacz A, Zięba Z (2021). The Assessment of water retention efficiency of different soil amendments in comparison to water absorbing geocomposite. *Materials (Basel)*. 14(21):6658. doi: 10.3390/ma14216658.
- Terán E, Escalera R (2007). Obtención de CMC a partir de linter de algodón. *Investigación y Desarrollo*. 7:100-113. doi:10.23881/idupbo.007.1-8i.
- Viera RG, Filho GR, de Assunção RM, da Carla C, Vieira JG, de Oliveira GS (2007). Synthesis and characterization of methylcellulose from sugar cane bagasse cellulose. *Carbohydrate Polymers*. 67:182-189. doi:10.1016/J.CARBPOL.2006.05.007.
- Vitousek PM, Field CB (1999). Ecosystem constraints to symbiotic nitrogen fixers: a simple model and its implications. *New Perspectives on Nitrogen Cycling in the Temperate and Tropical Americas: Report of the International SCOPE Nitrogen Project*. 179-202. doi:10.1007/978-94-011-4645-6\_9
- Zedler JB, Kercher S (2004). Causes and consequences of invasive plants in wetlands: opportunities, opportunists, and outcomes. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 23:431-452. doi:10.1080/07352680490514673.
- Zheng H, Mei P, Wang W, Yin Y, Li H, Zheng M, Ou X, Cui Z (2023). Effects of super absorbent polymer on crop yield, water productivity and soil properties: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*. 282:108290. doi:10.1016/J.AGWAT.2023.108290.