

Hilatura en húmedo de biopolímeros para la obtención de fibras biodegradables aplicadas en geotextiles agrícolas

Daniel Alcalá-Sánchez*, Juan-Carlos Tapia-Picazo, José de Jesús Serralta-Macías, Mayra-Stephanie De Lira Flores, Juan-Sebastian Chaves-Salazar.

Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos #1801, Fracc. Bona Gens C.P. 20255 Aguascalientes, Ags., México.

daniel.as@aguascalientes.tecnm.mx

Resumen: La alteración de suelos de uso agrícola asociada a residuos plásticos y desechos de la industria textil representa un problema ambiental de interés global, debido a la liberación de microplásticos (MPs) que afectan negativamente las características y propiedades esenciales para la productividad agrícola. En este contexto, el desarrollo de materiales poliméricos biodegradables y biocompatibles surge como una estrategia viable para sustituir, total o parcialmente, polímeros convencionales empleados en aplicaciones agrícolas. En este trabajo se presentan resultados parciales de un estudio integral enfocado en la síntesis, procesamiento y evaluación funcional de fibras biodegradables obtenidas a partir de copolímeros de acrilonitrilo injertados con almidón y quitosano. Se validó el procesamiento por hilatura en húmedo de tres fibras basadas en poli(acrilonitrilo-HEMA)-g-almidón, micropartículas de poli(acrilonitrilo-acetato de vinilo)-g-quitosano y un polímero reciclado de fibras acrílicas textiles. Las fibras fueron caracterizadas mediante FTIR, SEM y propiedades mecánicas. Posteriormente, se emplearon en la fabricación de geotextiles evaluados en cultivos de rábano a escala laboratorio. Los resultados biométricos y la caracterización de los cultivos cosechados a los 60 días demostraron la viabilidad técnica de los materiales, así como un ahorro aproximado del 50 % en el consumo de agua de riego respecto al sistema de control sin geotextil.

Introducción.

El uso extensivo de materiales poliméricos en la agricultura moderna ha contribuido de manera significativa al incremento de la productividad y a la optimización de recursos. Sin embargo, se ha generado un problema ambiental emergente asociado a la acumulación de residuos plásticos en los suelos agrícolas. Películas de acolchado, sistemas de riego y geotextiles fabricados a partir de polímeros sintéticos convencionales como el polietileno, polipropileno y poliéster, sufren procesos de degradación física y química que conducen a la formación de MPs. Estas partículas se incorporan al suelo afectando negativamente su estructura, porosidad y capacidad de retención de agua, además de interferir con la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana, con consecuencias directas sobre el desarrollo vegetal y la calidad de los cultivos. Los geotextiles agrícolas representan una aplicación particularmente relevante, ya que

permanecen en contacto directo con el suelo durante periodos prolongados. Aunque los geotextiles convencionales son de bajo costo y tiene propiedades mecánicas adecuadas, su carácter no biodegradable dificulta su recuperación al final de su vida útil. En este contexto, la sustitución parcial o total de estos materiales por plásticos biodegradables ha despertado un creciente interés tanto desde el punto de vista ambiental como tecnológico. Entre las principales estrategias exploradas se encuentra el uso de fibras naturales, como yute, lino, algodón o sisal, las cuales presentan ventajas en términos de origen renovable y biodegradabilidad. Pero su aplicación en geotextiles agrícolas se ve limitada por la variabilidad en composición y la baja resistencia mecánica en ambientes húmedos. Estas limitaciones impulsan el desarrollo de biopolímeros sintéticos y sistemas híbridos capaces de ofrecer propiedades ajustables y desempeño funcional controlado. Los biopolímeros basados en copolímeros de acrilonitrilo

modificados mediante injerto con polisacáridos como almidón o quitosano han demostrado un alto potencial para aplicaciones agrícolas. Estos sistemas permiten integrar la resistencia mecánica y estabilidad del esqueleto acrílico con la funcionalidad, hidrofiliidad y biodegradabilidad aportadas por los biopolímeros naturales [1]. Uno de los principales desafíos tecnológicos asociados a estos materiales es su transformación en fibras continuas, ya que los biopolímeros suelen presentar baja estabilidad reológica, interacción compleja con solventes y limitada capacidad de orientación molecular durante procesos de extrusión. La hilatura en húmedo, ampliamente utilizada para la producción de fibras textiles, se presenta como una alternativa viable para el procesamiento de estos sistemas. La presencia de fases biodegradables, injertos o partículas poliméricas genera complejidades adicionales relacionadas con la coagulación, difusión solvente–no solvente y formación de defectos estructurales en la fibra, lo que hace indispensable la validación experimental del proceso [2]. El presente trabajo reporta resultados parciales de un estudio integral enfocado en la síntesis, caracterización y validación del procesamiento por hilatura en húmedo de fibras biodegradables basadas en copolímeros de acrilonitrilo injertados con almidón y quitosano, así como en sistemas que incorporan polímero reciclado de fibras acrílicas. Las fibras obtenidas fueron empleadas en la fabricación de geotextiles evaluados en un sistema de cultivo de rábano a escala laboratorio, con el objetivo de demostrar la viabilidad de transformación de los biopolímeros y su funcionalidad agronómica en términos de desarrollo vegetal y eficiencia en el uso del agua de riego.

Parte experimental.

Materiales.

Tres sistemas poliméricos desarrollados en trabajos anteriores fueron utilizados para la obtención de fibras [3]. En la Tabla 1 se presenta la descripción de los biopolímeros.

Hilatura en húmedo.

Un sistema de extrusión-hilatura en húmedo fue utilizado para procesar los polímeros,

Figura 1. En el proceso de extrusión se utilizó una solución de hilatura al 14% en peso; un baño de coagulación de DMF/Agua (50/50, en peso); una esprea con 160 orificios circulares con un diámetro de 80 μm ; se emplearon tres baños de lavado a 60°C y una zona de secado a 80°C.

Tabla 1. Descripción de polímeros para fibras

Código	Sistema
BP-1	Poli(acrilonitrilo-HEMA)-g-almidón
	Mezcla, 97:3 (en peso)
BP-2	Poli(acrilonitrilo-HEMA)-g-almidón Poli(acrilonitrilo-acetato de vinilo)-g-quitosano
	Mezcla, 97:3 (en peso)
BP-3	Polímero de residuos de fibras textiles Poli(acrilonitrilo-acetato de vinilo)-g-quitosano

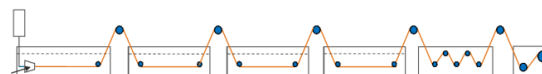


Figura 1. Sistema de extrusión-hilatura en húmedo.

Caracterización.

Muestras de fibras fueron caracterizadas mediante FTIR, denier, tenacidad y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Geotextiles.

Mediante punzonado manual se construyeron geotextiles en forma de disco con un diámetro de 50 mm y un espesor de 2 mm. Los geotextiles se colocaron en macetas con plántulas de rábano. Durante un periodo de 60 días se monitoreó el desarrollo de las plantas de rábano.

Resultados y discusión.

Obtención y caracterización de fibras.

Se obtuvieron tres fibras: Fibra-1 a base del polímero BP-1, la Fibra-2 a base del polímero BP-2 y la Fibra-3 a partir del polímero BP-3. En la Figura 2 se muestran los espectros FTIR de las fibras para la construcción de geotextiles. Se pueden observar las señales a $\sim 2250\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 1750\text{ cm}^{-1}$ asignadas a la fases vinílicas, grupos nitrilo $\text{-C}\equiv\text{N}$ y carbonilo -C=O , respectivamente, del comonomero injertado. La vibración de los grupos glucosídicos (C-O-C) en los rangos de $\sim 1140\text{-}1170\text{ cm}^{-1}$, $\sim 1062\text{-}1073\text{ cm}^{-1}$ y $\sim 994\text{-}1019\text{ cm}^{-1}$, así como los picos en el rango de $\sim 3260\text{-}3430\text{ cm}^{-1}$ de los grupos OH, son

asignados a las fases biodegradables de las fibras y que son otorgadas por los injertos de almidón y quitosano sobre la cadena principal del comonomero vinílico.

En la Figura 3 se pueden observar muestras representativas de fibras obtenidas por extrusión-hilatura en húmedo. En términos generales, las fibras a base de BP-1 y BP-2, presentan una coloración “marrón” y tienen una textura áspera derivada de la naturaleza química del biopolímero con almidón. La fibra a base de BP-3, presenta un aspecto “blanco” opaco el cual se atribuye principalmente a la base del residuo de fibra acrílica textil. A escala macroscópica, la incorporación de partículas de biopolímero de quitosano Fibra-2 y Fibra-3, no mostro alteraciones en la conformación de los filamentos. En la Figura 3 (d) se observa que las fibras desarrollas presentan diferencias significativas en cuanto a la tenacidad, lo cual está relacionado directamente con las condiciones de operación en la hilatura. Las fibras con BP-3 tiene un mayor diámetro y densidad lineal (denier) mientras que las fibras a base de BP-1 y BP-2, presentan menor diámetro y denier, lo cual puede ser benéfico en términos de área superficial.

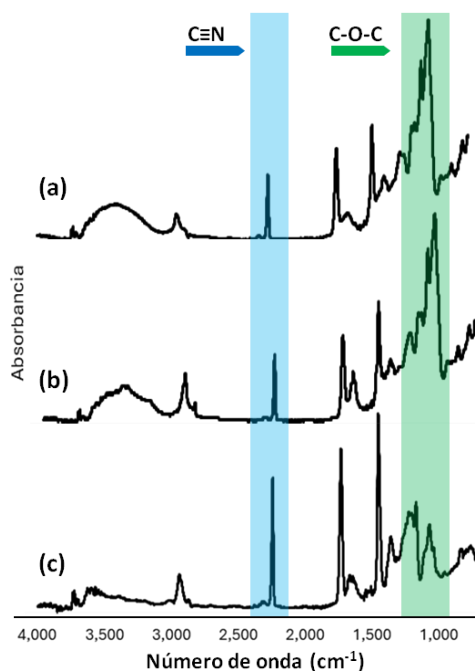


Figura 2. Espectros FTIR de fibras para geotextiles. (a) Fibra-1 a base de BP-1; (b) Fibra-2 a base de BP-2 y (c) Fibra-3 a base de BP-3.

Dentro del rango experimental de este estudio, se ha podido validar la capacidad de procesamiento de los biopolímeros en el sistema de hilatura en húmedo para obtener fibras con adecuada estructura que es suficiente para la construcción de geotextiles.

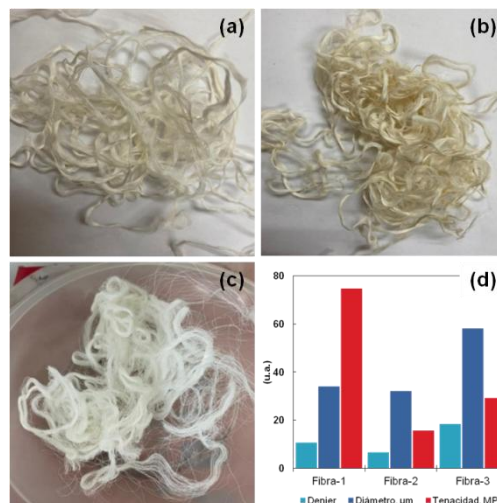


Figura 3. Muestras representativas de fibras para geotextiles. (a) Fibra-1 a base de BP-1; (b) Fibra-2 a base de BP-2; (c) Fibra-3 a base de BP-3 y (d) propiedades físicas.

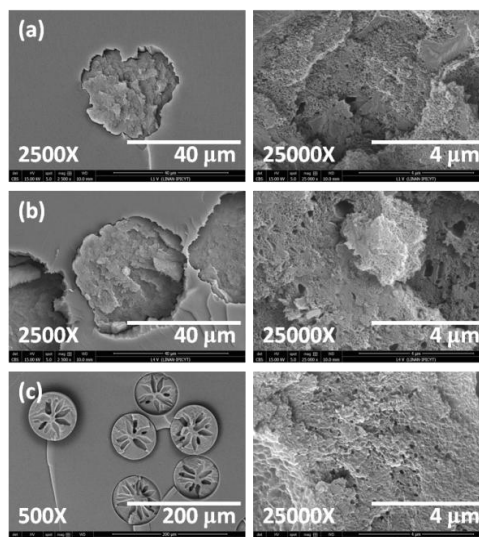


Figura 4. Análisis de SEM de fibras para geotextiles. (a) Fibra-1 a base de BP-1; (b) Fibra-2 a base de BP-2; (c) Fibra-3 a base de BP-3 y sus magnificaciones.

Mediante microscopia SEM se observaron las formas de la sección transversal de las fibras, Figura 4. Las fibras a base de BP-1 y BP-2, tienen una forma irregular en la

sección transversal, que es muy similar a fibras naturales celulósicas, con un mejor empaquetamiento molecular. La fibra a base de BP-3, presentó una forma circular y uniformidad en la sección transversal, pero con alto contenido de macroporos, los cuales son ocasionados por los procesos de difusión y contradifusión del solvente en el baño de coagulación. Así mismo, se observa que las tres fibras, presentan microporosidad en su estructura interna.

Construcción de geotextiles.

Las fibras fueron utilizadas para la construcción de geotextiles y posteriormente se evaluaron en un sistema de cultivo de rábano a escala laboratorio. En la Figura 5, se muestran los geotextiles antes y después de la evaluación en los cultivos de rábano. Es posible observar que los geotextiles sufren la transformación de su arquitectura al final de las pruebas de cultivo. Claramente se observa que los geotextiles con Fibra-1 y Fibra-2, sufrieron menos cambios, lo cual puede estar relacionado con la estabilidad mecánica de las fibras, en comparación con el geotextil con Fibra-3.

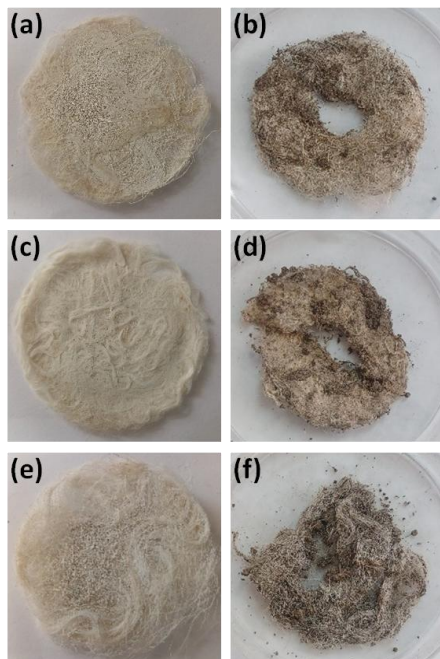


Figura 5. Muestras de geotextiles. (a) Geotextil con Fibras-1; (c) geotextil con Fibras-2; (e) geotextil con Fibras-3; (b), (d) y (f), geotextiles después de la evaluación en los cultivos de rábano.

Los resultados de este trabajo y de manera preliminar puede inferirse que el estudio en el procesamiento de los biopolímeros, se pueden establecer parámetros de operación que permitan la obtención de fibras para construcción de geotextiles con tiempo de vida útil específicos. Esto representa un área de oportunidad para el diseño materiales funcionales para distintos tipos de cultivos en términos de los tiempos de germinación, desarrollo-crecimiento y cosecha; y que posteriormente puedan ser integrados al suelo.

La Figura 6 muestra los perfiles de la evaluación biométrica de las plantas de rábano en términos de la longitud máxima de las hojas, la altura máxima de la planta, el ancho de hoja máximo y la cantidad de hojas. En general, se pueden ver comportamientos de crecimiento similares entre los cultivos con geotextil Figura 5 (a), (b) y (c) y las pruebas de control Figura 5 (d). Las pruebas con geotextiles a base de Fibras-1 y Fibras-2, mostraron un mayor largo de hoja y altura de la planta con respecto a las pruebas de control. Este resultado muestra el efecto positivo de los geotextiles para el crecimiento de la sección vegetal de las plantas de rábano. Finalmente se realizó una evaluación biométrica de los frutos obtenidos después de un tiempo de cultivo de 60 días. En la Figura 6 se presentan imágenes de muestras representativas de rábanos cosechados para los cultivos con geotextiles. Es evidente que el fruto de las pruebas de control Figura 6 (d), tiene una masa ligeramente mayor que el fruto obtenido con geotextil a base de FP-1, mostrando su funcionalidad. A pesar de no mostrar mayor crecimiento de frutos en los cultivos con geotextiles, puede observarse que el fruto obtenido con las pruebas con geotextiles no afecta significativamente el crecimiento y masa de los frutos, validando la funcionalidad técnica del geotextil en este tipo de cultivos. En principio, se puede inferir que el geotextil permite obtener frutos con características biométricas similares a cultivos con técnicas convencionales, pero con la ventaja de que el agua de riego utilizada es aproximadamente 50% menos que el agua utilizada en los cultivos de control.

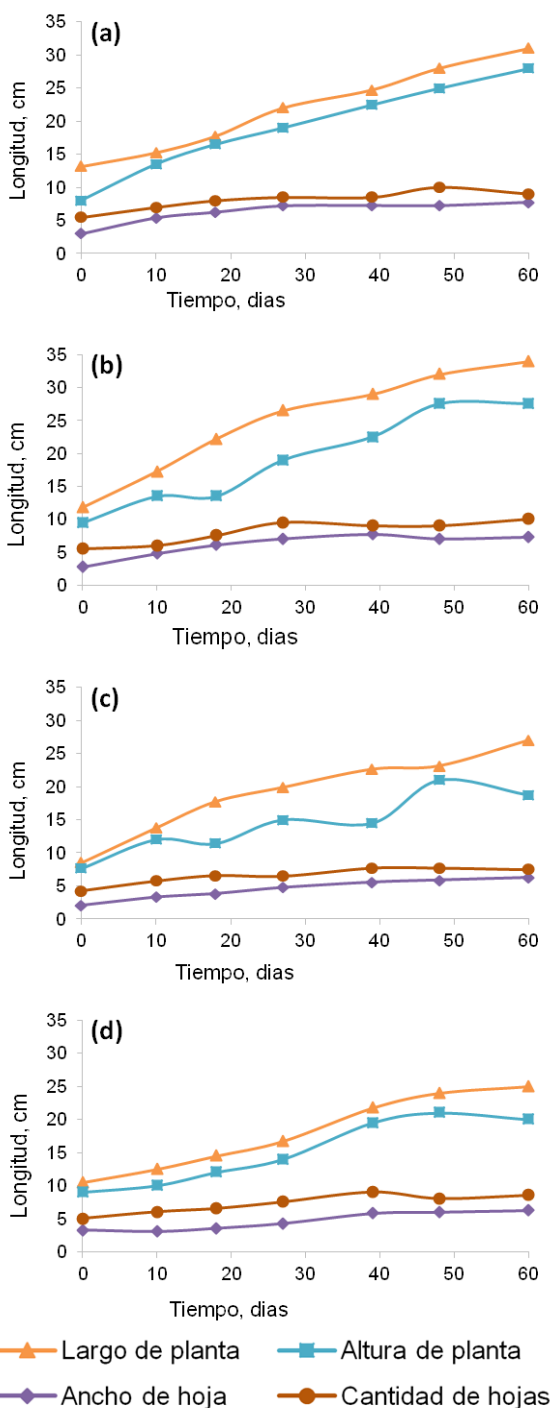


Figura 5. Evaluación biométrica de plantas de rábano. (a) Cultivos con geotextil a base de Fibra-1; (b) Cultivos con geotextil a base de Fibra-2; (c) cultivos con geotextil a base de Fibra-3 y (d) cultivos sin geotextil (control).

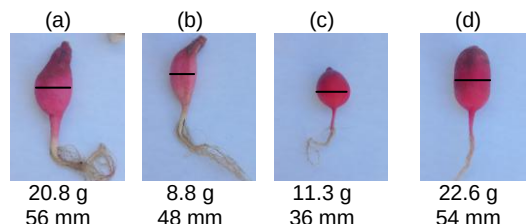


Figura 6. Evaluación biométrica de frutos. (a) con geotextil a base de Fibra-1; (b) con geotextil a base de Fibra-2; (c) con geotextil a base de Fibra-3 y (d) sin geotextil (control).

Conclusiones.

Los resultados preliminares demuestran la viabilidad de nuevos biopolímeros para aplicaciones agrícolas, capaces de procesarse en fibras mediante hilatura en húmedo y construir geotextiles con propiedades mecánicas adecuadas. Estos materiales mejoran la conservación de humedad sin afectar el desarrollo del cultivo, constituyendo una alternativa sostenible a geotextiles convencionales.

Agradecimientos.

Proyecto TECNM M00-PR-03-R01 (23230) Convocatoria 2025: Proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación. Programa de EPM-inicial 2022 de la SECIHTI. MC Ana Iris Peña Maldonado el Laboratorio Nacional de Investigación en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN-IPICYT) por el análisis SEM de la fibra desarrollada.

Referencias.

1. Temesgen, S.; Rennert, M.; Tesfaye, T.; Nase, M. Review on spinning of biopolymer fibers from starch. *Polymers* (2021), 13, 1121.
2. Susano, M. A.; Leonor, I. B.; Reis, R. L.; Azevedo, H. S. Elastic biodegradable starch/ethylene-co-vinyl alcohol fibre-mesh scaffolds for tissue engineering applications. *J. Appl. Polym. Sci.* (2014), 131, 40504.
3. Alcalá Sánchez D., Tapia Picazo J.C., Rodríguez Romero J.A., Luna Barcenás G., Bonilla Petriciolet A. Bio- based Terpolymers: Synthesis, Characterization, Wet- Spinning, and Evaluation as Geotextile. *Fibers and Polymers*, 26 (2025) 3729-3750.