

Obtención de fibras biodegradables mediante hilatura en húmedo para geotextiles de uso agrícola

Daniel Alcalá-Sánchez^a, Juan Carlos Tapia-Picazo^a, Azalia Lizeth Barrón-Hernández^a, Carlos Moisés Muro-Alcalá^a, José de Jesús Serralta-Macías^a.

^a) Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos #1801 Ote. Fracc. Bona Gens, C.P. 20255 Aguascalientes, Ags. México.
daniel.as@aguascalientes.tecnm.mx

Resumen: La acumulación de microplásticos (MPs) en suelos de uso agrícola ha generado un desafío significativo para la sustentabilidad de los ecosistemas, su estructura y capacidad de retener nutrientes de manera óptima se ha visto gravemente afectada. Los materiales convencionales basados en polímeros sintéticos han contribuido notablemente a este problema. La búsqueda de materiales alternativos sustentables y biodegradables que posean propiedades fisicoquímicas y mecánicas adecuadas para ser utilizadas en geotextiles de uso agrícola sigue siendo un desafío para la ciencia de polímeros y fibras. El objetivo de este trabajo es desarrollar fibras biodegradables a base de polímeros de almidón y quitosano en un sistema de extrusión-hilatura en húmedo. Un diseño de experimentos de tipo ortogonal se utilizó para analizar el efecto de parámetros de la hilatura como concentraciones, temperaturas y velocidad de extrusión en las propiedades morfológicas y mecánicas de las fibras producidas. Los análisis indican que las fibras muestran estructuras adecuadas para conservar la humedad en los suelos y con resistencia mecánica suficiente para ser usadas en la preparación de geotextiles agrícolas. Este estudio contribuye a la generación de fibras con composiciones químicas innovadoras basadas en biopolímeros, que pueden ofrecer una alternativa factible para reemplazar los polímeros convencionales que generan microplásticos. Además, los materiales resultantes pueden ayudar en la mejora de la eficiencia del agua en sistemas agrícolas y en la reducción de impactos ambientales.

Introducción.

La acumulación de microplásticos (MPs) en suelos agrícolas plantea una amenaza significativa para la sostenibilidad ambiental y la calidad de la producción agrícola. Los MPs tienen su fuente principal en residuos plásticos industriales y películas agrícolas. Los MPs alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo, disminuyen la fertilidad e interfieren en procesos esenciales como el ciclo de nutrientes. Además, pueden liberar aditivos químicos y metales pesados, afectando el crecimiento vegetal y la salud humana a través de la bioacumulación en la cadena alimenticia^{1, 2}.

En este contexto, los biopolímeros surgen como una solución innovadora para sustituir de manera parcial o total a los plásticos convencionales. Materiales como el almidón y el quitosano, derivados de fuentes renovables, han demostrado ser versátiles en la síntesis de biopolímeros, su capacidad para

formar estructuras poliméricas mediante injertos o copolimerización con monómeros vinílicos permite mejorar propiedades mecánicas, hidrofílicas y térmicas.

Los geotextiles, comúnmente a base de polímeros sintéticos de difícil degradación, son estructuras esenciales en la ingeniería de suelos que promueven la retención de humedad, el drenaje y la revegetación. El desarrollo de fibras a partir de polímeros de origen biológico, para la construcción de geotextiles, enfrenta desafíos en procesos como la hilatura debido a las limitaciones moleculares y reológicas de los biopolímeros^{3, 4}.

Con la evolución en ciencia de polímeros, es de gran importancia el estudio avanzado de reacciones de polimerización, el uso de herramientas como simulación y modelación matemática, permiten predecir propiedades moleculares clave y mejorar procesos para desarrollar nuevos biomateriales con aplicaciones sostenibles.

Este trabajo investiga la hilatura en húmedo de terpolímeros biodegradables a partir de almidón y quitosano que han sido sintetizados en base a resultados de estudios de simulación y modelación matemática. Una fibra seleccionada se evaluó en la construcción y aplicación de un geotextil en un sistema de cultivo de rábano. Este trabajo permite el aporte al diseño de soluciones innovadoras para el manejo sustentable de suelos agrícolas.

Parte experimental.

Materiales

Los polímeros poli(acrilonitrilo-co-2 hidroxi etil metacrilato)-g-almidón, P(AN-S), y poli(acrilonitrilo-co-acetato de vinilo)-g-quitosano, P(AN-C), fueron sintetizados bajo condiciones de operación definidas como resultado de estudios de simulación y modelación matemática de reacciones de polimerización en suspensión⁵; poli(acrilonitrilo-co-metil metacrilato), P(AN-M), se obtuvo de Grupo Textil de Aguascalientes SA de CV. DMF de Aldrich, St. Louis, MO y el fertilizante NPK-UREA de Agroindustrias del Balsas SA de CV, fueron utilizados sin ningún pretratamiento.

Hilatura en húmedo

Los polímeros P(AN-S), P(AN-C) y P(AN-M), fueron utilizados para la obtención de fibras en un sistema de hilatura en húmedo. Para obtener la solución de hilatura, los biopolímeros se disolvieron en DMF a 60°C durante 3 h y 350 rpm. Un diseño de experimentos Taguchi L8 fue establecido para investigar el efecto de siete variables en el sistema de hilatura en húmedo sobre las propiedades de fibras. La Tabla 1 muestra las variables y los valores utilizados en el diseño de experimentos.

Geotextiles

Las fibras obtenidas en el diseño de experimentos fueron impregnadas con una solución acuosa al 15 % de nutriente NPK-UREA (50:50) a temperatura ambiente. Después de 24 h, las fibras se secaron en un

horno a 50°C y posteriormente fueron caracterizadas. Una fibra seleccionada se utilizó para construir un geotextil (no tejido) para evaluarlo en un sistema sencillo de cultivo escala laboratorio. El geotextil se colocó en macetas con plántulas de rábano. El contenido de humedad de la tierra en las macetas de rábano y los datos biométricos se monitoreó en un periodo de 7 semanas.

Tabla 1. Diseño de experimentos Taguchi L8 para hilatura en húmedo de biopolímeros

Variable	Nivel 1	Nivel 2
A, polímero base	P(AN-S)	P(AN-M)
B, concentración P(AN-C), %pp	1	3
C, concentración de solución de hilatura, % pp	14	18
D, concentración baño de coagulación, % pp	20	30
E, velocidad de hilatura, m/min	0.8	1.0
F, temperatura de secado, °C	70	80
G, relación de impregnación nutriente/fibra	3	10

Resultados y discusión.

Ocho fibras a partir de biopolímeros fueron obtenidas de acuerdo al diseño de experimentos. Las propiedades de las fibras tales como densidad, capacidad de impregnación, diámetro, tenacidad y morfología, pueden ser controladas por la concentración de la solución en el baño de coagulación, la concentración de la solución de hilatura, la velocidad de coagulación y temperatura de secado en el sistema de hilatura en húmedo. Esto puede ser evidenciado por los resultados de la caracterización de las fibras. La Figura 1, muestra los resultados de las diferentes pruebas en el sistema de hilatura.

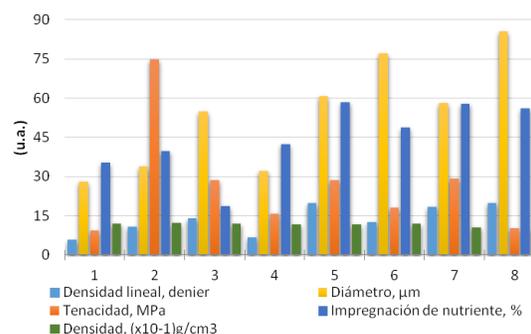


Figura 1. Resultados de la caracterización de las fibras del diseño de experimentos L8.

En la Figura 3, se muestran los resultados de la caracterización por microscopía óptica de las fibras del diseño de experimentos. Como se puede observar, las fibras presentan diferentes formas en la sección transversal. Las fibras que son a base de P(AN-S) (fibras 1 a la 4) presentan formas irregulares en comparación con las fibras a base de P(AN-C)/P(AN-M), las cuales presentan formas circulares en la sección transversal. Las fibras a base de P(AN-C)/P(AN-M) presentan diámetros más grandes que las fibras basadas en P(AN-S). Por otro lado, es posible observar en la sección transversal de de las fibras de P(AN-C)/P(AN-M), la presencia de macroporos. En los procesos de hilatura en húmedo, es bien conocido que la forma de la sección transversal de las fibras es determinada por los fenómenos de transferencia de masa por difusión. Para el caso de las fibras de P(AN-C)/P(AN-M), la forma circular sugiere que en el proceso, las tasas de difusión son más controladas, permitiendo así, que las fibras adquieran la forma de la esprea (orificios circulares) y que las bajas interacciones entre los componentes no generan tensiones que deformen la geometría de los filamentos. Además, en la composición química de la solución de hilatura, que para este caso involucra un "blend" entre un biopolímero a base de quitosano y un polímero acrílico, este último, colabora en el proceso de difusión mediante la afinidad entre las bases vinílicas y el solvente en el baño de coagulación. En contraste con las fibras a base de P(AN-S), las cuales no contienen P(AN-M), se observan formas irregulares que pueden estar asociadas a las interacciones entre el biopolímero, el solvente orgánico y el agua en el baño de coagulación. Para el caso de las fibras de P(AN-C)/P(AN-M) el P(AN-M) tiene más afinidad con el solvente y en las fibras de P(AN-S), los grupos -OH pueden tener mayor afinidad al agua del baño de coagulación. En resumen, la composición química del biopolímero y la interacción entre el solvente y el no-solvente, definen los procesos de difusión y son determinantes en la morfología de las fibras.

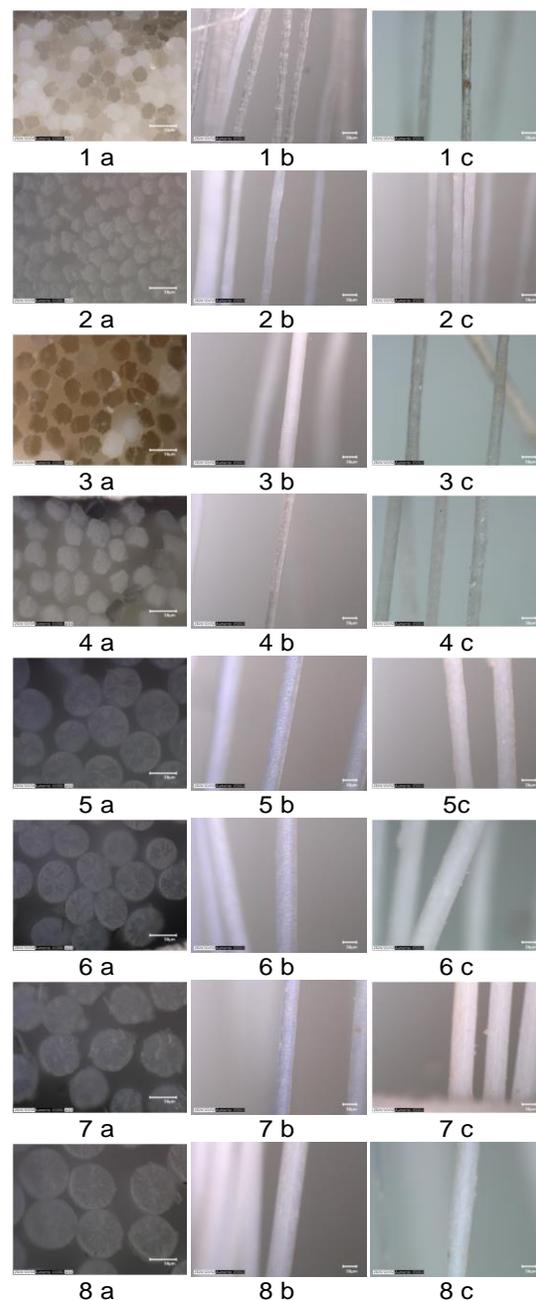


Figura 2. Microscopía óptica de las ocho fibras del diseño de experimentos de hilatura en húmedo. El número debajo de cada imagen se refiere a la prueba del diseño de experimentos; a, cortes transversales, b, corte longitudinal sin impregnación y c, corte longitudinal con impregnación.

El efecto de los parámetros de control en el sistema de hilatura utilizados en el diseño de experimentos sobre la densidad, el diámetro, la tenacidad y el porcentaje de impregnación de nutriente, fue analizado mediante análisis de varianza (ANOVA). En la Tabla 2, se presenta el resumen del ANOVA, tomando el valor de F (distribución F de Fisher) como indicador del efecto de los parámetros sobre las variables de respuesta. De manera comparativa, un mayor valor de F , implica una mayor influencia del factor de control sobre la variable de respuesta.

De la Tabla 2 se observa que para la densidad lineal (denier), la única variable que afecta es el tipo de polímero base, A. Las variables que afectan la densidad másica en orden de magnitud son el tipo de polímero base A > la concentración de P(AN-C) B > la concentración de la solución de hilatura C > la temperatura de secado F > la concentración en el baño de coagulación D. Para el diámetro, solo afecta el tipo de polímero base A y la velocidad de hilatura E. Las variables que afectan el porcentaje de impregnación de nutriente sobre la fibra es como sigue: tipo de polímero base A > velocidad de hilatura E > temperatura de secado F > concentración de solución de hilatura C > concentración en el baño de coagulación D > relación nutriente fibra G. Finalmente las variables que afectan a la tenacidad de las fibras solamente son la temperatura de secado F y la velocidad de hilatura E.

En base a los resultados obtenidos es posible inferir que la composición química de los biopolímeros en la solución de hilatura y el baño de coagulación son determinantes en las propiedades de las fibras evaluadas en este estudio a excepción de la tenacidad y dentro del rango de operación de este estudio. En referencia al diámetro de las fibras y la tenacidad, se observa una gran influencia de parámetros que involucran ordenamientos moleculares a lo largo del eje de las fibras, como la velocidad de hilatura y temperatura de secado que generan estiraje y colapsan los poros en la estructura de la fibra.

Es interesante que para la capacidad de absorción de nutriente, la única variable que no afecta es la concentración de P(AN-C), sin embargo, parámetros como la velocidad de hilatura y la temperatura de secado juegan un rol importante sobre la capacidad de integrar agentes a la superficie de las fibras que a su vez puede estar relacionado con la funcionalidad de retención de humedad.

Tabla 2. Resumen ANOVA, valores de F (F de Fisher)

Var.	Densidad lineal	Densidad másica	Diámetro	% de Impregnación	Tenacidad
A	5.20	100.12	21.53	280.06	0.73
B	0.47	90.74	1.18	0.00	0.90
C	0.01	44.14	0.44	16.37	0.45
D	0.29	3.59	0.90	11.15	0.22
E	0.06	0.87	4.57	61.73	2.76
F	0.06	11.12	0.38	28.54	3.08
G	-	-	-	5.01	-

La fibra 2, que se obtuvo a partir de la prueba dos del diseño de experimentos fue seleccionada en base a sus propiedades mecánicas para la construcción de un geotextil (no tejido). En la Figura 3, se presenta una muestra del geotextil desarrollado y el sistema semi-real para su evaluación en un sistema sencillo de cultivo de rábano. En la Figura 4, se muestra el análisis de la fibra 2 utilizada para el geotextil en donde es posible observar estructuras con gran similitud a fibras lignocelulósicas, que son determinantes para el comportamiento mecánico de la fibra y la capacidad de retención de humedad.

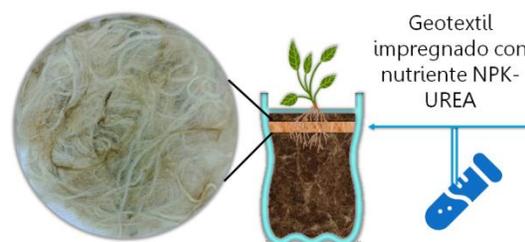


Figura 3. Evaluación de geotextil en sistema semi-real a partir de Fibra 2.

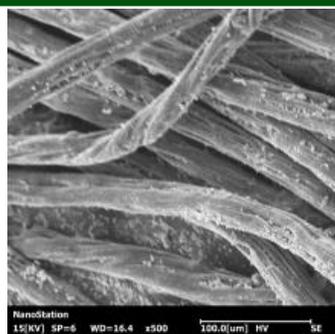


Figura 4. Análisis SEM de fibra 2 para construcción de geotextil.

En la Figura 5, se presenta el sistema empleado para la evaluación del geotextil. Un ejemplar sin geotextil fue utilizado como referencia para la evaluación comparativa de retención de humedad de tierra en la maceta y datos biométricos. Las macetas fueron regadas y se tomaron muestras de tierra después de 24 horas para conocer el contenido de humedad. Se observó que en los ejemplares con geotextil, la tierra presenta mayor humedad. El ejemplar con geotextil presentó un contenido de humedad de 12.89% en peso y el ejemplar sin geotextil tuvo una humedad de 6.16%. Este resultado sugiere que el geotextil favorece la retención de humedad y puede ayudar a reducir la cantidad de agua de riego cerca del 50%. Por otro lado, en la observación biométrica de las plantas de rábano, no se presentan diferencias significativas entre los especímenes con y sin geotextil dentro del periodo de evaluación del presente estudio.

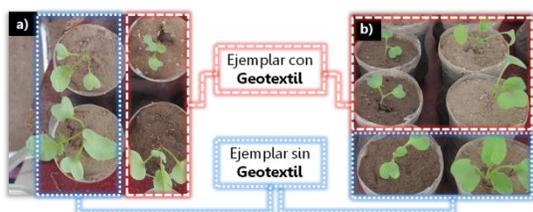


Figura 5. Evaluación de geotextil con fibra a base de P(AN-S) en plantas de rábano. a) Evaluación de retención de humedad y b) comparativo biométrico.

Conclusiones.

Este estudio ha permitido establecer la importancia de evaluar el procesamiento de polímeros que han sido obtenidos a partir del resultado de estudios de simulación y modelación matemática de reacciones polimerización en sistema de hilatura en húmedo. El sistema de hilatura empleado representa una opción viable y efectiva para la producción de materiales y fibras que pueden ser utilizadas para la fabricación de geotextiles. Esto amplía el conocimiento sobre las capacidades de los terpolímeros de base biológica en la industria textil y abre nuevas posibilidades para el desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes en el sector de la ingeniería agrícola.

Agradecimientos.

Al Dr. Carlos Sánchez López del TecNM/ITA por la facilitación y apoyo en la pruebas de microscopía óptica.

Referencias.

- Hyunchul, A.; Jae Hyung, W.; Yong Min, K.; Woong Ryeol, Y.; Sang Young, Y. Microstructure and mechanical properties of polyacrylonitrile precursor fiber with dry and wet drawing process. *Polymers* 2021, 13, 13101613. <https://doi.org/10.3390/polym13101613>
- Fukui, Y.; Teramua, T.; Yoshimi, T. Analysis of fiber drawing in wet spinning for surface roughness. *MATEC Web Conf.* 2021, 333. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133311006>
- Temesgen, S.; Rennert, M.; Tesfaye, T.; Nase, M. Review on spinning of biopolymer fibers from starch. *Polymers* 2021, 13, 1121. <https://doi.org/10.3390/polym13071121>
- 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. <https://doi.org/10.1002/app.40504>
- Meza-Díaz, O.; Tapia-Picazo, J.-C.; Bonilla-Petriciolet, A.; Luna-Bárceñas, G.; Alcalá-Sánchez, D.; Jaime-Leal, J.-E.; Herrera-Franco, P.-J. Analytical steady-state model for the free radical solution copolymerization of acrylonitrile and vinyl acetate and their charge-transfer complex in a continuous stirred tank reactor. *Int. J. Chem. Eng.* 2023, 3245973. <https://doi.org/10.1155/2023/3245973>