JOCYTEC
Jóvenes en la Ciencia y la Tecnología
Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria

https://n9.cl/jocytec
Navarro-Balderrabano y col., JOCYTEC: Jóvenes en la ciencia y la tecnología. Año. 3, No. 1 (2026), 46-56. ISSN: 3061-7448

PLASTIFICACIÓN INTERNA DEL ALMIDÓN POR MODIFICACIÓN QUÍMICA MEDIANTE INJERCIÓN DE GRUPOS PROVENIENTES DE GLICEROL.

INTERNAL PLASTICIZATION OF STARCH BY CHEMICAL MODIFICATION THROUGH THE INSERTION OF GROUPS DERIVED FROM GLYCEROL.

Arely Navarro-Balderrabano[1], Pedro Raymundo García-Morán[1*], Shirley Carro-Sánchez[1], Karina del Ángel-Sánchez[2].

[1]Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Carretera Apizaquito S/N, San Luis Apizaquito, C.P. 90401, Apizaco, Tlaxcala.

[2] Tecnológico de Monterrey, Instituto de Materiales Avanzados para Manufactura Sostenible, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col: Tecnológico, Monterrey, N.L., 64700, México

*pedroraymundo.garcia@uatx.mx

Recibido: 29-junio-2026 Aceptado: 30-06-2025

RESUMEN

En este documento se reportan los resultados de la modificación de almidón de maíz mediante la injerción de moléculas de glicerol en soluciones ácidas de un ácido fuerte, AF, como el ácido clorhídrico (HCl) y otra de un ácido débil (AD), como el ácido acético. En los espectros de infrarrojo se aprecia el incremento de la intensidad de la banda del grupo hidroxilo, OH, indicando que la cantidad de este grupo se ha incrementado. En las gráficas de tiempo de reacción contra la absorbancia, la cual es directamente proporcional a la concentración, para cada modificación, aunque los datos presentan cierta dispersión, claramente se aprecia un incremento, lo que indica el incremento del grado de modificación del almidón de maíz. Asimismo, se muestra una serie de películas preparadas a partir de almidón modificado y glicerol. De éstas, la muestra preparada con almidón modificado mediante ácido acético a 60°C por 24 hs, con almidón previamente remojado formó una película con mejores propiedades.

***Palabras Clave*:** modificación de almidón, películas de almidón -glicerol, modificación de almidón por soluciones ácidas.

ABSTRACT

The results of the modification of corn starch by grafting glycerol molecules under acidic conditions are reported herein. Two reaction media were employed: a strong acid (AF), such as hydrochloric acid (HCl), and a weak acid (AD), such as acetic acid. In the infrared spectroscopy spectra of starch modified, using AF and AD, an increase in the intensity of the hydroxyl (OH) absorption band can be observed, indicating an increase in the amount of this functional group. The relationship between reaction time and absorbance, which is directly proportional to concentration, for each modification method is also reported. Although the data exhibit some degree of scatter, a clear increase in

absorbance with increasing reaction time is evident, making it possible to observe the increase in the degree of corn starch modification. A series of films prepared from modified starch and glycerol is presented. Among these, the film prepared from starch modified with acetic acid at 60°C for 24 h using pre-soaked starch shown better properties.

***Keywords*:** starch modification, starch-glycerol films, starch modification by acid solutions.

1. INTRODUCCIÓN

El almidón, un polisacárido natural abundante y renovable, destaca como un componente crucial en la búsqueda de alternativas sostenibles a los plásticos derivados del petróleo. Ante la creciente preocupación global por la contaminación plástica y el agotamiento de los recursos fósiles, el almidón ofrece una solución prometedora. Su importancia radica en su naturaleza biodegradable y compostable (Jiang et al., 2020).

Para que el almidón pueda funcionar eficazmente como un bioplástico, su modificación química o física es esencial. Este proceso es fundamental porque transforma al almidón en un material con un intervalo de procesamiento más amplio y propiedades mecánicas mejoradas, permitiendo su uso viable en la fabricación industrial de productos que requieren durabilidad y resistencia, superando así las limitaciones de fragilidad del almidón sin modificar (Vaca-Ulloa y col., 2025)

El almidón nativo presenta una estructura semicristalina con fuertes interacciones de puentes de hidrógeno, lo que resulta en una baja estabilidad térmica y una tendencia a absorber humedad. Estas características dificultan su procesamiento por métodos convencionales, como extrusión o moldeo. Para la modificación del almidón existen diferentes métodos ya sea física o química. La modificación física implica la adición de plastificantes (como el glicerol o agua) y la aplicación de cizallamiento y calor, lo cual rompe esta estructura cristalina, reduciendo las interacciones intramoleculares y aumentando la flexibilidad de las cadenas poliméricas. Principalmente, se busca que los bioplásticos obtenidos a partir de almidón de maíz se degraden en subproductos seguros después de su uso, en condiciones normales de compostaje. Es por eso que el uso de plastificantes, como el agua y el glicerol, son las mejores alternativas para modificar la estructura interna del almidón y así obtener un material termoplástico con diferentes aplicaciones (Aburto et al., 1999).

De acuerdo con diferentes estudios se ha observado que para lograr una modificación eficaz del almidón es necesaria su desestructuración mediante su gelificación; la cual depende del tipo de almidón, la temperatura y la longitud de la cadena ramificada de amilopectina en proporción con la de amilosa. En conclusión, los almidones en proporción de amilosa: amilopectina 70:30 se gelatinizan alrededor de 160-170 °C y en proporción de amilosa: amilopectina 28:72 se gelatinizan alrededor de 52-65 °C (Fang et al., 2003). Sin embargo, en investigaciones previas se ha planteado una problemática. Cuenca et al. (2020) obtuvieron acetato de almidón de mandioca con un alto grado de sustitución, DS= 2.9, a partir de soluciones filmogénicas, utilizando como plastificante externo (2-dodecen-1-il) anhídrido succínico (DSA) a diferentes concentraciones. Obtuvieron películas, con buenas propiedades al desmoldarlas, pero luego de dos semanas de almacenamiento mostraron un comportamiento de segregación del plastificante hacia la superficie, lo que ocasionó que la película mostrara apariencia cerosa y quebradiza. También, emplearon el acetato de almidón

de mandioca como resina utilizando dos plastificantes externos, DSA y glicerol, a diferentes concentraciones. Utilizaron papel kraft como material para recubrir con dicha resina, a diferentes tiempos de contacto, dando como resultado agrietamiento a la hora de secar y segregación a la superficie de la película de los dos tipos de plastificantes.

Una solución a este problema puede ser la modificación química, la cual se centra principalmente en las reacciones de los grupos hidroxilo (-OH) del polímero, incluyendo la esterificación (como la acetilación), la eterificación y la oxidación, entre otras. Por ejemplo, la modificación con ácido acético logró aumentar la solubilidad y la estabilidad de la viscosidad, mejorando las propiedades de barrera y la tensión a la fractura en películas bioplásticas (Tomasik y col., 1995; Runkel y col., 1999).

En este trabajo se buscó modificar químicamente el almidón de maíz, a partir de soluciones ácidas, empleando grupos funcionales provenientes del glicerol, con la finalidad de otorgarle características plásticas internamente, buscando evitar la migración del plastificante y, por lo tanto, la pérdida de propiedades plásticas.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Plastificación de almidón

La plastificación en un polímero es una modificación física, se logra agregando un agente plastificante como agua, glicerol, sorbitol, polietilenglicol, entre otros. Con esto se logra disminuir las fuerzas intermoleculares, aumentar la movilidad de las cadenas poliméricas, reducir la fragilidad, disminuir la temperatura de transición vítrea, (Chiellini, 2008). Esta plastificación aumenta volumen libre, separa cadenas, disminuye cristalinidad efectiva y reduce viscosidad aparente; cuando estos agentes se usan con polisacáridos, como el almidón, los vuelve flexibles lo que permite formar películas flexibles. Sin embargo, la estabilidad térmica de la película es limitada; el calor provoca que el agente plastificante migre a la superficie y poco a poco se vaya perdiendo, haciendo que la película se vuelva rígida y quebradiza. Por otro lado, si el agente plastificante se injerta en el polisacárido la plasticidad del polímero será permanente y estable al calentamiento; por ejemplo, si se injerta una cantidad de glicerol en los grupos alcohol del almidón se tendría un termoplástico susceptible de ser moldeado en caliente. El almidón ha sido injertado, principalmente, con estireno y luego plastificado con glicerol (Fang y col. 2024), el estireno le confiere cierto carácter hidrofóbico.

2.2. Extracción del almidón

Las fuentes de almidón se pueden clasificar en tres grupos (Thomas et al., 2026); el primer grupo es el de los cereales, entre los que se encuentra el trigo, maíz, arroz, avena, cebadas y centeno; el segundo grupo es el de los tubérculos, en el que se hayan las papas o patatas, boniato (camote o batata), ñame, taro, yuca o mandioca; en el tercer grupo se encuentran las lentejas, garbanzos, frijoles, habas, chícharos o guisantes y soya. Aquí se mencionan solo algunas fuentes por grupo, cada uno con diferentes porcentajes de almidón. El almidón de maíz contiene 26 % de amilosa y 74 % de amilopectina, la fécula de maíz contiene gránulos de almidón de un tamaño medio de 14.3 µm. El gránulo de almidón está constituido por unidades esféricas ordenadas que, a su vez, comprenden láminas de amilosa y amilopectina, formando las zonas amorfas y cristalinas (Verma y Srivastav, 2021).

La extracción del almidón de maíz comprende las operaciones de maceración, molienda, separación del germen, separación de fibras, separación de proteína y secado del almidón. El remojo del grano

de maíz debilita sus fibras, eso transforma sus partes insolubles en solubles, provoca el hinchamiento del grano y la debilitación de los enlaces. Sin embargo, la última etapa en la que se lleva el secado del almidón representa la mayor dificultad, ya que al exceder la temperatura puede llegar a provocar la gelatinización de éste (Ji y col. 2004).

2.3. Modificación química de almidón de maíz

El almidón puede modificarse para cambiar las características fisicoquímicas mediante métodos físicos, químicos y enzimáticos. Entre los métodos químicos están la reticulación, esterificación, eterificación, oxidación, modificación dual, hidrólisis química, etc. (Verma & Srivastav, 2021). La reticulación de almidón afecta principalmente las propiedades físicas y el comportamiento de transición térmica del almidón, depende del origen del almidón y del agente de reticulación. Se pueden llegar a utilizar diferentes equipos como extrusores, secador de tambor, secador por aspersión, etc. que inciden en las características funcionales del almidón ya modificado (Verma & Srivastav, 2021). Este método evita el uso de reactivos peligrosos y enzimas costosas. Sin embargo, requiere de más tiempo y, por lo regular, de equipos costoso en comparación con otros métodos (Palavecino et al., 2019). En el método de oxidación de almidón se añade un oxidante que reacciona con el almidón a una temperatura y pH adecuados. Se utiliza hipoclorito para producir almidón oxidado, utilizado principalmente para adhesión, área alimenticia y para la formación de películas. Sin embargo, este proceso presenta una gran cantidad de aguas residuales alcalinas; así como un bajo rendimiento en la producción de almidón oxidado (Verma & Srivastav, 2021). La modificación dual usualmente combina dos métodos; por ejemplo: fisicoquímicos y enzimáticos; tomando en cuenta acetilación/oxidación, reticulación/acetilación o reticulación/hidroxipropilación por nombrar algunos, con el fin de mejorar las propiedades químicas y funcionales del almidón modificado dualmente (Verma & Srivastav, 2021). Cuando el almidón se modifica por esterificación o acetilación, el almidón se esterifica homogéneamente obteniéndose un termoplásticos con la capacidad de formar películas biodegradables., dicha modificación consiste en la desestructuración de los granos de almidón por medio de gelatinización. La esterificación solo se produjo con cloruros de acilo de 6 a 10 átomos de carbono. Esto evidenció que el almidón activado y el agua o hidróxido libres compiten por reaccionar con el cloruro de acilo. Las condiciones de reacción son adecuadas para una reacción exitosa con el almidón con cadenas en el intervalo de 6 a 10 átomos de carbono; fuera de este intervalo, los cloruros de acilo se hidrolizan bajo las condiciones de reacción y se convierten en sus sales, sin que se produjera sustitución del almidón (Fang et al., 2004). En el laboratorio, la reacción puede llevarse a cabo en un solo paso si se utiliza un ácido fuerte como catalizador. Sin embargo, con mayor frecuencia, la reactividad del ácido carboxílico se potencia convirtiéndolo primero en cloruro de ácido carboxílico, que luego reacciona con el alcohol (McMurry, 2012).

3. METODOLOGÍA

3.1 Sustancias químicas

Las sustancias químicas utilizadas fueron almidón de maíz para uso exclusivo de laboratorio de la marca MEYER, también se empleó glicerina pura para uso de laboratorio, ácido acético (A. Ac., CH_3COOH) al 99.90% en solución 1M, ácido clorhídrico (HCl) al 36.5-38% en solución 1M, alcohol metílico, hidróxido de sodio (NaOH) en solución 1M y como disolvente agua tridestilada.

3.2 Procedimiento para la modificación química del almidón de maíz

El método de modificación se basó en el reportado por Lahrour y col. (2019). Como catalizador se usó un ácido débil, ácido acético, y un ácido fuerte, ácido clorhídrico, HCl. En algunas corridas el

almidón se sometió a un remojo previo por 48 horas, esto para mejorar la humectación y desestructuración del grano de almidón, en otras se usó sin remojar previamente.

Para la modificación se prepararon soluciones acuosas de glicerina (5 ml de glicerina en agua) y de almidón de maíz (5 g de almidón en agua), esto con la finalidad de desestructurar el almidón (Albertsson y Karlsson, 1995). Posteriormente, se mezclaron las dos soluciones en un matraz de fondo redondo de tres bocas sumergido en un baño caliente de sal, en lugar de aceite por seguridad, luego se adicionaron 3 ml de HCl 1M mediante goteo, manteniendo agitación y temperatura constante con ayuda de una plancha de calentamiento con agitación magnética. Se dejó reaccionar por 24 horas bajo reflujo. Pasado el tiempo de reacción se midió el pH de la mezcla obtenida, entonces se ajustó a un valor neutro usando una solución de NaOH 1M. Después se precipitó goteando la solución en 150 ml de metanol, posteriormente el precipitado se recuperó mediante filtración, el cual se secó a peso constante en estufa a 40°C. Con la finalidad de recuperar el almidón en la parte filtrada, ésta se sometió a evaporación en un rotavapor a vació y 50°C, la cual también se secó a peso constante. Algunas muestras fueron sometidas a liofilización, para ello se congelaron previamente durante 24 hs, y entonces se liofilizaron durante 24 horas. Cuando la muestra mostró humedad visible se repitió el proceso. De igual forma, se secaron en estufa hasta peso constante.

3.3 Formación de películas de almidón de maíz

Se elaboraron películas mezclando almidón modificado químicamente, las películas se prepararon mediante el método de vaciado en placa; éste consiste en elaborar soluciones filogénicas al 5% p/p de almidón modificado adicionando glicerol y agua tridestilada (0, 15, 25, 35 y 45 % p/p), homogenizando mediante agitación, luego se sometieron a reflujo a una temperatura de 90 °C. Las soluciones filmogénicas se vertieron en un molde de vidrio rectangular con dimensiones de 2 cm de ancho por 10 cm de largo, luego se dejaron solidificar a temperatura ambiente. De esta forma, una vez secas, se obtuvieron las películas para cada muestra, respectivamente.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Mediante la modificación química se busca la injerción de moléculas de glicerol en los grupos hidroxilo, -OH, de la molécula de almidón. La señal de característica, por espectroscopía de infrarrojo, del grupo -OH se localiza alrededor de los 3256 cm^{-1}. La Figura 1 presenta las curvas para las muestras C1AF60-2, C5AF60-13, C6AF60-16, C8AF60-22 y almidón sin modificar, la figura solo muestra la banda del grupo OH y no todo el espectro debido a que es la banda donde mejor se aprecian los cambios. Las modificaciones se hicieron usando un ácido fuerte (AF), como el HCl 1M, a una temperatura de 60 °C para 2, 13, 16 y 22 horas de reacción. En todos los casos se observa un incremento de la intensidad de la señal para el grupo -OH respecto de la intensidad del almidón sin modificar lo que indica que se logró injertar la molécula de glicerol en el almidón.

Por otro lado, la Figura 2 presenta las curvas de espectroscopia de infrarrojo para diversas muestras de almidón modificado; la modificación fue catalizada con un ácido débil, AD, como el ácido acético 1M, las corridas se hicieron a 50 °C y tiempos de reacción de 20, 30, 40 y 60 horas. Las muestras se denominaron como C1AD50-20, C2AD50-30, C3AD50-40, C4AD50-50, C5AD50-60 y se comparan con almidón sin modificar. En todos los casos se observa un ligero incremento de la intensidad de la señal para el grupo -OH respecto de la intensidad del almidón sin modificar

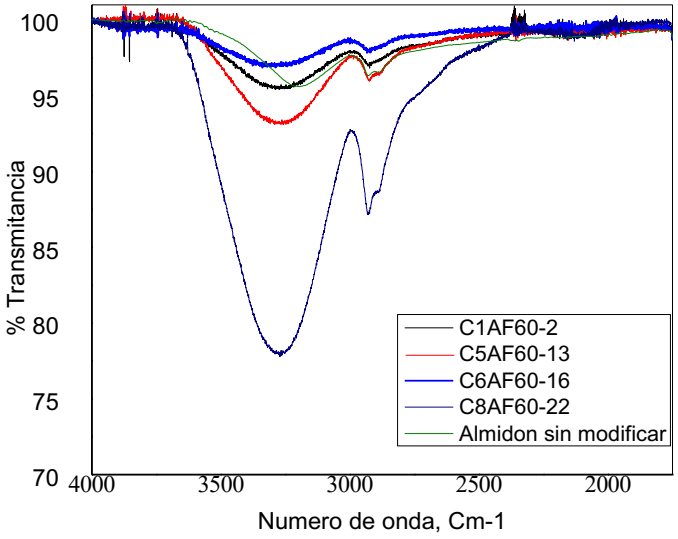


Figura 1. Espectros de infrarrojo para diversas muestras de almidón modificado, modificación catalizada con un ácido fuerte, AF, como el HCl 1M, modificación realizada a 60 °C y tiempos de reacción de 2, 13, 16 y 22 horas.

Comparando las Figuras 1 y 2 se observa que cuando en la reacción de modificación se usó un ácido fuerte, como el ácido clorhídrico, la señal correspondiente al grupo -OH es más intensa, lo que indica que la injerción de glicerol en almidón es mayor.

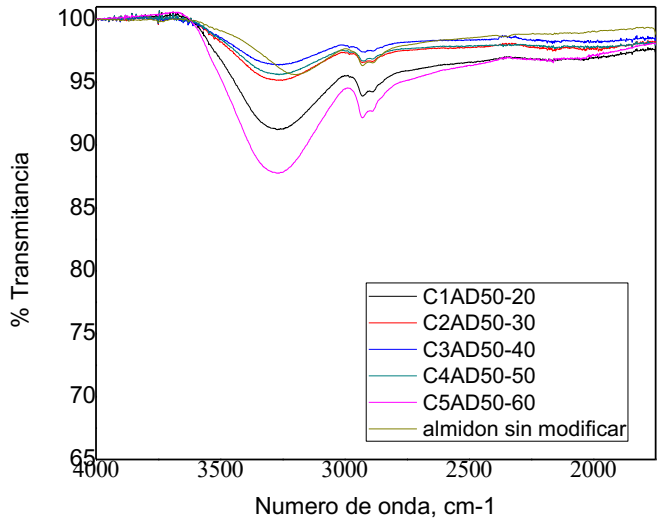


Figura. 2. Espectros de infrarrojo para diversas muestras de almidón modificado, modificación catalizada con un ácido débil, AD, como el ácido acético 1M, modificación realizada a 50 °C y tiempos de reacción de 20, 30, 40, 50 y 60 horas.

El incremento de la concentración de grupos OH, con respecto del tiempo, se puede estimar en función de la intensidad de la banda característica de 3256 cm^{-1} para dicho grupo funcional. Para ello se usan los espectros de infrarrojo de los cuales se recuperó el % Transmitancia para el grupo

OH, dado que la absorbancia es proporcional a concentración, A=ε*lc*, siendo ε coeficiente de absorción molar o absortividad molar, *l* la longitud de la celda o camino óptico y c concentración de la especie absorbente, en este caso el grupo OH. Las absorbancias se determinaron mediante ecuación 1 (Atkins & de Paula, 2006).

$$A = -log_{10}\left(\frac{\%T}{100}\right) \quad (1)$$

donde % T es el porciento de transmitancia y A la absorbancia.

La Figura 3 muestra la evolución de la absorbancia de los grupos -OH, en muestras de almidón modificado. No obstante, a pesar de tener pocos puntos se puede apreciar que la proporción de grupos OH, provenientes de la molécula de glicerol, se incrementa al paso del tiempo, la muestra correspondiente a 22 horas de reacción es la que muestra el mayor incremento.

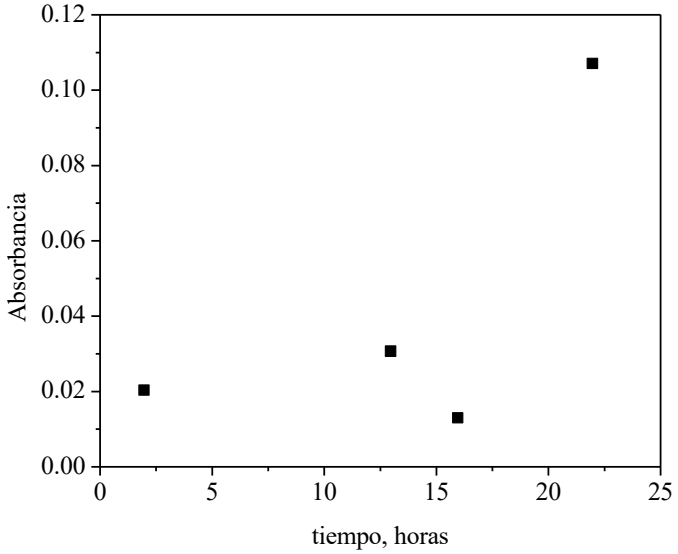


Figura. 3. Incremento de la proporción de grupos OH en muestras de almidón modificado conforme aumenta el tiempo de reacción. Muestras modificadas con glicerol, usando HCl como catalizador y 60 °C.

En cuanto a la modificación empleando un ácido débil, AD, como el ácido acético, correspondientes a las curvas mostradas en la Figura 2. La Figura 4 muestra el incremento de la absorbancia debido al incremento de la concentración de grupos OH en las muestras de almidón modificadas. La muestra a 2 horas muestra una proporción de alrededor de un 20 %, lo que parece anómalo para el tiempo de reacción; el resto de las muestras presentan un comportamiento más congruente, siendo la muestra de 60 horas la que alcanzó la mayor modificación.

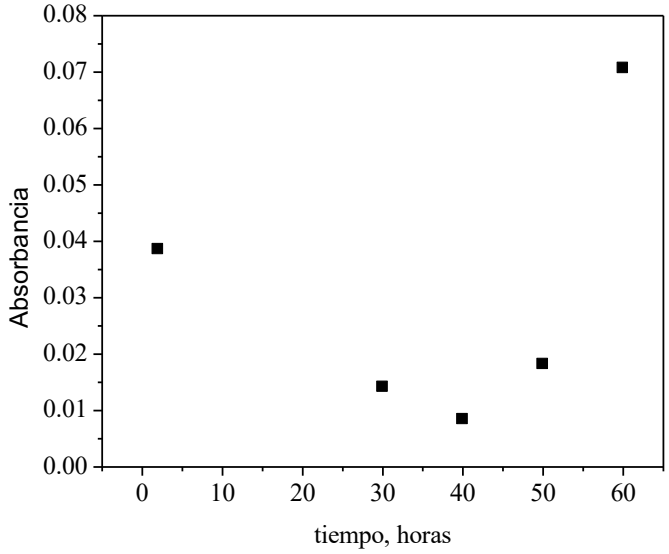


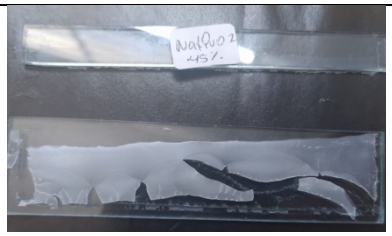
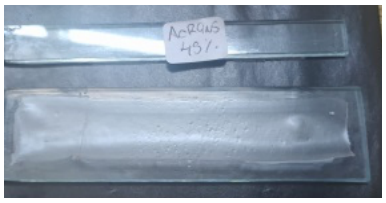
Fig. 4. Incremento de la proporción de grupos OH en muestras de almidón modificado conforme aumenta el tiempo de reacción. Muestras modificadas con glicerol, usando ácido acético como catalizador y 50 °C.

4.1 Películas de almidón de maíz

Las películas se prepararon a partir de una solución en la que se puso glicerol, almidón modificado y se sometió a calentamiento a reflujo; una vez que la mezcla se homogenizó se vació en un molde de aluminio de 10x2x1 cm y se dejó enfriar y solidificar a temperatura ambiente. Se hicieron muchas corridas, en su mayoría, las películas no presentaron flexibilidad, una vez secas se volvieron frágiles y quebradizas, pero algunas si lograron ser flexibles.

En la Tabla 1 se presentan ejemplos de las películas obtenidas, como la película de almidón sin modificar, así como la preparada con almidón modificado usando HCl como catalizador, AF11-60-NR-45, que resultaron quebradizas, y dos muestras catalizadas con ácido acético, de éstas la película AD2-60-R-45 mostró las cualidades buscadas, como flexibilidad y estabilidad mecánica.

Tabla 1. Algunas películas obtenidas a partir de soluciones de polímero modificado o polímero sin modificar conteniendo 45 % de glicerol respecto al peso del almidón.

Muestra	Película	Análisis
Almidón sin modificar		Película quebradiza, frágil, no permite su manejo.
AF11-60-NR-45		Película preparada con almidón sin remojo previo, modificado mediante glicerol y HCl 1M, 60 °C por 24 hs. La película tendió agrietarse y romperse al separarla del molde.
AD78-R-45		Película preparada con almidón modificado mediante ácido acético, 78°C por 1 hora y 23 min, previamente remojado. La película se pudo someter a una prueba de tensión, se rompió de manera desigual arrojando datos erróneos.
AD2-60-R-45		Película preparada con almidón modificado mediante ácido acético, 60°C por 24 hs, previamente remojado. Formó la mejor película, se sometió a una prueba de tensión permitiendo la obtención del Módulo de Young.

5. CONCLUSIONES

De los dos sistemas probados para modificar el almidón de maíz se encontró que los que utilizan un ácido fuerte, como el ácido clorhídrico alcanzan mayor grado de modificación, indicado como un incremento en la señal para el grupo OH en los espectros de infrarrojo a partir de las 22 horas de reacción química. En tanto que los sistemas en los que se utilizó un ácido débil, como el ácido acético, se observó que la modificación es más ligera, ya que se aprecia que se alcanzó la mayor modificación a las 60 horas de reacción. En cuanto a la formación de película, la muestra que emplea

almidón previamente remojado, con ácido débil como catalizador, mostró las mejores cualidades como flexibilidad, estabilidad mecánica y no se rompe con facilidad al manipularla.

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos que declarar

REFERENCIAS

Atkins, P., & de Paula, J. (2006). Atkins' physical chemistry (8th ed.). Oxford University Press.

Aburto, J., Alric, I., Thiebaud, S., & Panayiotou, C. (1999). Synthesis, characterization, and biodegradability of fatty-acid esters of amylose and starch. Journal of Applied Polymer Science, 74(6), 1440–1451. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991107)74:6<1440::AID-APP17>3.0.CO;2-V

Chiellini, E. (Ed.). (2008). Environmentally compatible food packaging. Elsevier/Woodhead Publishing.

Cuenca, P. S., Ramallo, L., & Albani, O. (2020). Películas y materiales compuestos basados en almidón de mandioca acetilado de alto grado de sustitución. RECyT, 33, 85–93.

Fang, J., & Fowler, P. (2003). The use of starch and its derivatives as biopolymer sources of packaging materials. Journal of Food, Agriculture and Environment, 1(3), 82–84.

Fang, K., Wang, H., Wang, X., Xia, F., et al. (2024). An intensive exploration of plasticization, tensile, flexural and ecotoxicity of styrene-grafted thermoplastic starch (TPS) composite material. Industrial Crops and Products, 220, 119285. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119285

Ji, Y., Seetharaman, K., & White, P. J. (2004). Optimizing a small-scale corn-starch extraction method for use in the laboratory. Cereal Chemistry, 81(1), 55–58. https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.1.55

Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., & Yu, L. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 3(1), 8–18. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003

Lahrour, S., & Benali, A. B. (2019). Glycerin-grafted starch as corrosion inhibitor of C-Mn steel in 1 M HCl solution. Applied Sciences, 9(22), 1–18. https://doi.org/10.3390/app9224758

McMurry, J. (2012). Organic chemistry (8th ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.

Palavecino, P. M., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2019). Impact of chemical modifications in pilot-scale isolated sorghum starch and commercial cassava starch. International Journal of Biological Macromolecules, 135, 521–529. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.158

Runkel, D., Stoye, H., Rapthel, I., & Kakuschke, R. (1999). Method for preparation of starch esters (German Patent DE 19805367).

Thomas, S., James, J., Maria, H. J., & James, J. (Eds.). (2026). Polymer interfacial characteristics: In polymer blends, IPNs, gels, and composites. De Gruyter.

Tomasik, P., & Jane, J.-L. (1995). Reaction of starch and cellulose with products of thermal decomposition of mono- and disaccharides. Starch/Stärke, 47(1), 24–29. https://doi.org/10.1002/star.19950470107

Vaca-Ulloa, K. E., Mena Pastor, P. G., & Saquicela Cruz, P. S. (2025). Bioplásticos a partir de almidón modificado: Avances en propiedades y biodegradabilidad. Horizonte Académico, 5(1), 356–371. https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n1.87

Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2022). Isolation, modification, and characterization of rice starch with emphasis on functional properties and industrial application: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *62*(24), 6577–6604. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1903383