



Novedosas alternativas para el diseño de biomateriales a partir de almidones modificados dualmente

Lucila Concepción Núñez-Bretón¹, Luis Medina-Torres², Diola Marina Núñez-Ramírez³, Barbara Cooper-Bribiesca⁴, Mónica Reyes-Reyes⁵, José Esteban López-Aguilar⁷, Francisco Erik González-Jiménez⁶, O. Manero¹

¹ Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. Departamento de Reología y Mecánica de Materiales, Circuito Exterior S/N, Circuito de la Investigación Científica, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México

² Facultad de Química, UNAM. Circuito Exterior S/N, Coyoacán, Cd. Universitaria, 04510, Ciudad de México, México

³ Facultad de Ciencias Químicas, UJED. Av. Veterinaria S/N, Circuito Universitario, Valle del sur, 34120, Durango, México

⁴ Escuela Nacional Preparatoria Plantel 2, UNAM. Circuito Interior Avenida Río Churubusco 1418, Carlos Zapata Vela, Iztacalco, 08040, Ciudad de México, CDMX

⁵ Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. Wilfrido Massieu S/N, U.P. Adolfo López Mateos, 07738, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, CDMX

⁶ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Oriente 6 1009, Rafael Alvarado, 94340 Orizaba, Veracruz, México

⁷ Facultad de Química, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México
lucilanunez-breton@materiales.unam.mx

Resumen

Los biomateriales actuales deben ser multifuncionales, dinámicos y biocompatibles. También deben ser capaces de proporcionar una plataforma para las interacciones biológicas y químicas. Al emplear diversas biomoléculas que formen parte de la composición del biomaterial, tanto la superficie como la estructura pueden alterarse para facilitar la adaptación del mismo al entorno fisiológico de los seres vivos y al mismo tiempo realizar las funciones requeridas. En

recientes investigaciones se ha reportado que el almidón (un polisacárido) presenta potenciales propiedades para ser utilizado como biomaterial, entre otras cosas por su origen natural, ser de fácil obtención y también económico. Es la reserva de energía de muchas fuentes vegetales, también es comestible, no tóxico, biodegradable, biocompatible y puede modificarse fácilmente. No obstante, sus aplicaciones industriales se han visto limitadas por ciertas propiedades intrínsecas del almidón, como su rápida

retrogradación, insolubilidad en agua fría, hidrofiliidad, sinéresis (pérdida de agua), altas temperaturas de gelatinización, poca resistencia a la fuerza de cizalla o bajas propiedades mecánicas y de barrera. Esto nos ha llevado a modificar al almidón y obtener así diferentes propiedades físicas, químicas, funcionales y mecánicas que permiten ampliar el espectro de uso. Actualmente, diversos grupos de investigación se han enfocado en obtener almidones con más de una modificación, es decir, almidones modificados dualmente, ya sea por métodos físicos, químicos y/o enzimáticos, o la mezcla entre estos. El principal objetivo es incrementar su funcionalidad, resolver problemas de solubilidad, estabilidad, mejorar propiedades mecánicas al flujo, anfifílicas, de digestibilidad, de barrera funcional, entre otras. Bajo este contexto, es relevante conocer las características de este tipo de biopolímero, sus variedades, en qué consisten las modificaciones que se realizan, cuándo se habla de modificaciones duales y cómo se emplean para el diseño de biomateriales. Este artículo puede servir como una breve introducción al tema, pues debemos recordar que se siguen explorando nuevas alternativas que sean viables y efectivas para beneficiar al ser humano y a los seres vivos, con el desarrollo de biomateriales que cubran algunas de las necesidades específicas.

Palabras claves

Almidón, modificación dual, biopolímeros.

¿Qué es el almidón y por qué es un biopolímero?

Los biopolímeros son macromoléculas formadas por numerosas unidades repetitivas denominadas monómeros, estos están constituidos por sustancias orgánicas derivadas de fuentes naturales, como plantas,

animales y microorganismos. Algunos de estos se caracterizan por ser no tóxicos, biodegradables y biocompatibles, y el almidón cumple con todas estas propiedades. De acuerdo a su origen (o procedencia de extracción de fuentes naturales), al almidón se le denomina biopolímero. La principal función del almidón en plantas es servir como fuente de reserva de energía. Es por esto que ocupa el segundo lugar de abundancia en la naturaleza, estando en primer lugar la celulosa. Este se almacena (después de la fotosíntesis) en los amiloplastos, dentro de la célula vegetal, y mayoritariamente se encuentran en tejidos de almacenamiento, como los meristemos, cotiledones, en el endospermo de las semillas, tubérculos y frutas inmaduras. El almidón tiene diferentes mecanismos de biosíntesis para el desarrollo de la planta y para su acumulación, esto depende de su origen botánico, condiciones genéticas, agronómicas y ambientales [1].

¿Un biopolímero puede ser utilizado para diseñar biomateriales?

Un biomaterial es cualquier sustancia o conjunto de sustancias diseñadas para interactuar con sistemas biológicos con el propósito de beneficiar al ser humano u otros organismos, teniendo una respuesta biológica aceptable a lo que se le conoce como biocompatibilidad, además de ser biodegradable, lo que lo hace amigable con el ambiente y esto cambia dependiendo del área de aplicación. Los biomateriales pueden tener una variedad de propiedades únicas o múltiples, como es la bioactividad, biodegradabilidad, biocompatibilidad y no toxicidad. Sin embargo, actualmente no hay ninguna composición uniforme de un biomaterial que cumpla con todos los requerimientos necesarios para una función requerida. Por tal motivo, es de gran inte-

res emplear biopolímeros con propiedades específicas que puedan ser susceptibles a modificación o funcionalización, de tal forma que sean parte de un sistema complejo, capaz de interactuar con componentes de sistemas vivos. En relación con lo anterior, el almidón ha presentado propiedades para interactuar con muchos compuestos, manteniendo su capacidad de formar biomateriales [2].

¿Por qué es importante la composición química del almidón?

Este biopolímero está formado por moléculas orgánicas: unidades de glucosa (anhidroglucosa) conectadas entre sí mediante enlaces glucosídicos. Al estar formado únicamente por estas moléculas recibe el nombre de homopolisacárido, de fórmula general $(C_6H_{10}O_5)_n$, y está compuesto por alrededor de 1000 hasta 2000 000 unidades de glucosa. Estas se unen mediante enlaces α -(1-4), que dan origen a la cadena lineal amilosa (20 a 30 %), y α -(1-6), correspondiente a la cadena ramificada amilopectina (70 a 80 %), estos enlaces se presentan aproximadamente cada 22 unidades (esto ocasiona que sea una estructura compleja y semicristalina). Dependiendo de la fuente botánica y del mecanismo de biosíntesis se define la composición física, química y morfológica, así como la estructura molecular de la amilosa y la amilopectina de cada fuente de extracción de almidón. La importancia de su composición química radica en que las moléculas de glucosa presentan tres grupos hidroxilo reactivos, que en la mayoría de los casos tiene un grupo hidroxilo primario y dos secundarios, esto hace que las glucosas presentes en el almidón puedan ser susceptibles a reacción bajo ciertos entornos químicos (que lo hace apto a sufrir modificaciones a nivel estructural [3] (Figura 1)).

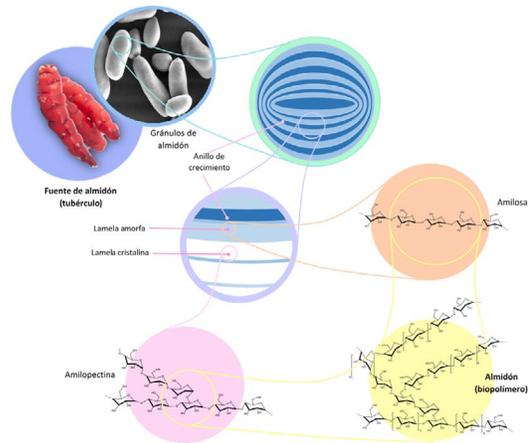


Figura 1. Estructura química del almidón (biopolímero) [modificado de Adewale *et al.*, 2022]

Fuentes de Almidón

Millones de toneladas de almidón se extraen anualmente de diversas fuentes convencionales como el maíz (64 %), trigo (6 %), papa (6 %), mandioca y otras fuentes (como el arroz). También se ha ampliado la extracción de este biopolímero a partir de otras fuentes no convencionales, debido a su alta demanda alimentaria o para otras aplicaciones comerciales como los biocombustibles. Estas fuentes prometen ser una alternativa para disminuir costos y mejorar las propiedades de las fuentes convencionales. Dentro de las fuentes no convencionales de almidón se encuentran algunos tubérculos, frutas (mango verde, plátano verde, manzanas, jaca y sus semillas), rizomas (jengibre, cúrcuma, flor de loto), cereales (amaranto, mijo), pseudocereales (trigo sarraceno), legumbres (frijol lima, frijol blanco, lenteja), frutos secos (castaño de indias, castaño de agua), además de los desechos agroindustriales [4].

Principales aplicaciones a nivel mundial

Se proyecta que para el año 2024 el mercado global del almidón se valore entre \$ 67.1 y \$ 112 mil millones de dólares, a un creci-

miento anual compuesto (CAC) de entre 5.75 y 5.90 %, esto de acuerdo con la amplia gama de aplicaciones industriales que posee (Tabla 1). Dichas aplicaciones están relacionadas con los cambios estructurales que sufre el almidón [5]. Si no se le realiza ninguna alteración y la extracción es directa de la fuente vegetal se le denomina almidón nativo, mientras que al almidón que ha tenido transformaciones biológicas, químicas o físicas se le denomina almidón modificado.

Estrategias para la modificación del almidón

Las modificaciones al almidón se han propuesto de acuerdo a las mejoras que se requieren a nivel industrial [4]. Estos cambios moleculares se enfocan principalmente en generar beneficios demostrables en ciertas propiedades, tales como disminución de la temperatura de gelatinización, incremento de la viscosidad, mayor claridad de pastas, incremento de la capacidad de gelificación, estabilización de emulsiones, mayor capa-

cidad para retener lípidos, entre otras. Esto tiene la finalidad de disminuir costos a nivel de producción y mejorar los productos en los que se emplean.

Un ejemplo de este tipo de modificaciones (Figura 2) son las físicas, las cuales implican tratamientos libres de productos químicos que alteren la composición estructural del gránulo y dentro de ellas se encuentran las térmicas, no térmicas y otras. Las modificaciones químicas introducen compuestos químicos permitidos por la agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), mediante reacciones químicas que se llevan a cabo entre las cadenas poliméricas del almidón y estas se engloban principalmente en la etificación, esterificación, entrecruzamiento, oxidación y cationización. Finalmente, las modificaciones enzimáticas alteran la estructura molecular del almidón a través de enzimas, principalmente hidrolíticas [10].

Tabla 1. Aplicaciones del almidón

Industrias	Ingresos 2020 (millones de dólares)	Función	Aplicación	Referencia
Alimentaria	32 000	Materia prima, aditivos, estabilizadores, recubrimientos, edulcorantes.	Helados, dulces, prebióticos, salsas, mayonesas, ketchups, mermeladas, budines, rellenos de frutas para confitería, carne y verduras enlatadas, yogures y alimentos congelados.	[6]
Forraje	2 000	Nutriente, espesante, aglutinante.	Piensos y forrajes.	[5]
Papelera	16 000	Espesante, encolador, aglutinante, proveedor de resistencia mecánica.	Papel, cartón, adhesivos, filtros.	[7]
Farmacéutica	3 000	Excipientes, aerogeles, cubiertas, estabilizantes, acarreador de dextrosa, hidrogeles.	Tabletas, cubiertas de cápsulas, polvos, gel antiséptico, bioadhesivos, micelas con medicamentos.	[8]
Otras (química, minera, textil, construcción, polimérica y cosmética)	3 000	Recubrimientos, depresores, agentes de flotación, encoladores, espesantes, coloides, protectores, aglutinantes, electrolitos sólidos.	Bioplásticos, biocombustible, etanol, adhesivos, telas.	[9]

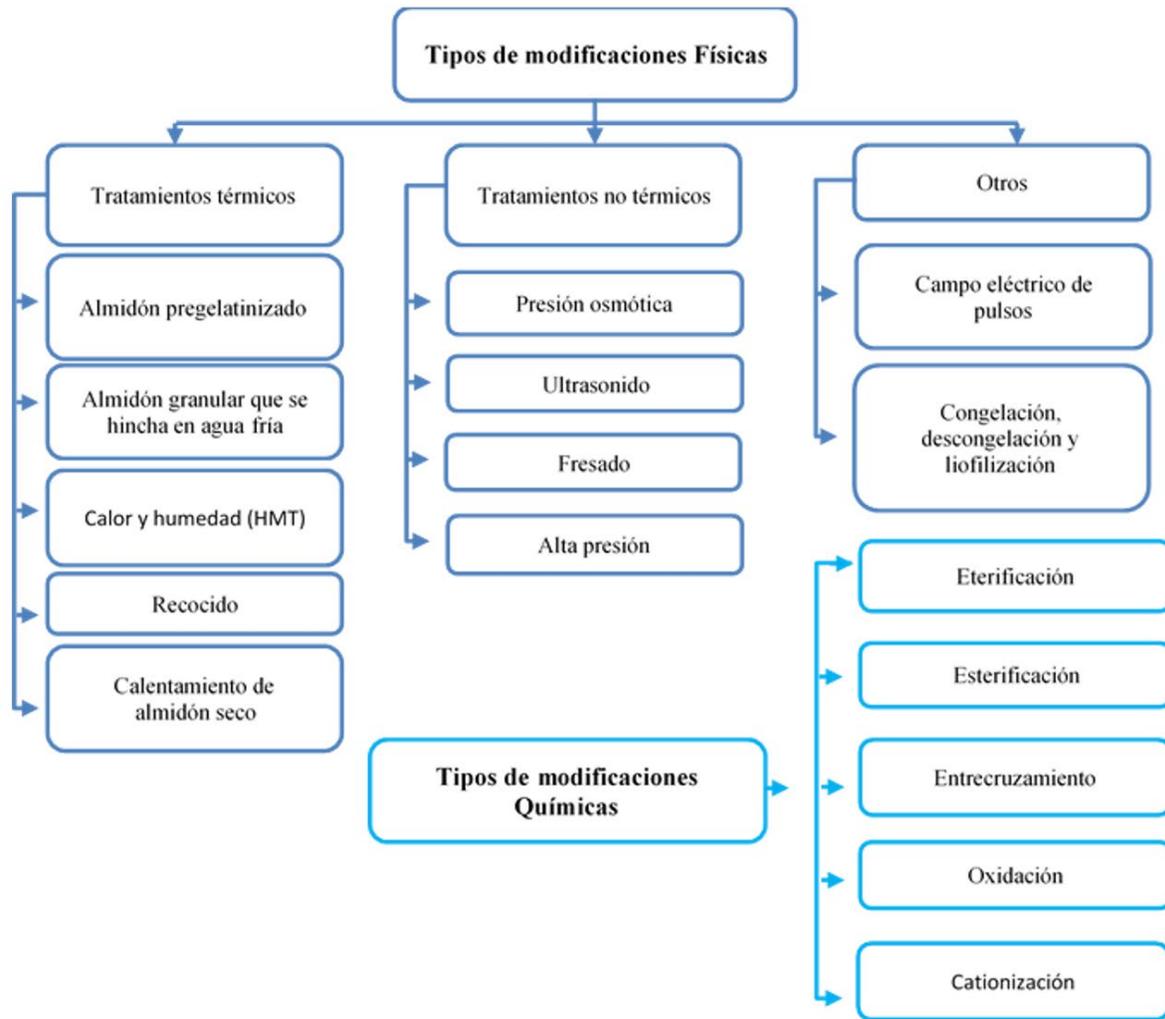


Figura 2. Clasificación de tratamientos empleados durante las modificaciones físicas y químicas del almidón [11]

¿Qué es la modificación dual?

Los diferentes métodos de modificación al almidón nativo favorecen el incremento de sus propiedades, sin embargo, las modificaciones únicas de los almidones han resultado ser ineficaces cuando se necesita más de una propiedad a otorgar. Esto implica, por ejemplo, el aumento de los costos al emplear otros compuestos, utilizar dos o más almidones con propiedades específicas o incluso integrar aditivos en las diferentes industrias de interés. Derivado de estos inconvenientes surge la necesidad

de combinar métodos de modificación física, química y/o enzimática y a esto se le denomina modificación dual.

Clasificación de las modificaciones duales

La modificación dual puede clasificarse en modificaciones químicas duales, físicas duales y enzimáticas duales. Estas, a su vez, se dividen en dos tipos de modificaciones, las cuales son modificación homo dual y hetero dual. Una modificación homo dual se da cuando el almidón es tratado por dos

métodos similares, es decir, el almidón es modificado químicamente en primer lugar por entrecruzamiento y posteriormente se esterifica. Por otra parte, la modificación heterodual altera al almidón por dos métodos distintos, ejemplo de esto es combinar un método físico seguido de un método químico y a este tipo de modificación también se le conoce como modificación heterogénea dual [12] (Figura 3).

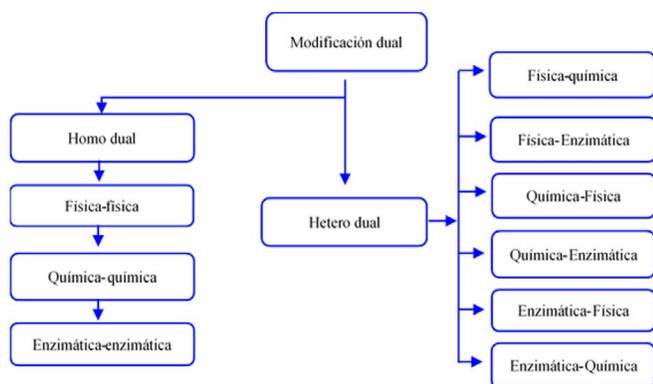


Figura 3. Clasificación de la modificación dual [12]

Métodos para caracterizar e identificar los almidones modificados dualmente

Después de llevar a cabo las metodologías seleccionadas para la obtención del almidón modificado dualmente es necesario realizar la identificación y caracterización macro y microestructural para comprobar que se llevaron a cabo de manera exitosa las alteraciones a las moléculas del almidón (amilosa y amilopectina), ya sea por vías físicas, químicas o enzimáticas. En la Figura 4 se observa la estructura química de un almidón homo dual modificado, resultante de una modificación por esterificación y entrecruzamiento donde se incorporaron dos tipos de reactivos modificadores y se formaron enlaces covalentes que refuerzan la estructura química del almidón, además de dar una doble funcionalidad, con fines específicos.

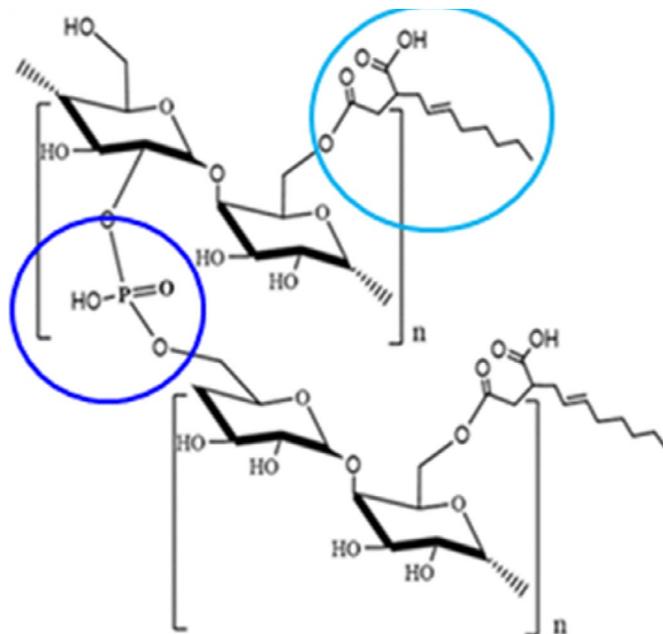


Figura 4. Almidón homodual modificado por método químico-químico. Reactivo modificador entrecruzante (compuesto con fósforo) y esterificante (anhídrido)

Dentro de las propiedades que identifican que dichas modificaciones fueron efectivas se mencionan algunas de ellas:

- Químicas: grado de sustitución y contenido de amilosa y amilopectina.
- Propiedades funcionales: claridad de pasta, sinéresis (pérdida de agua), poder de hinchamiento, índice de absorción de agua, índice de solubilidad de agua e índice de absorción de lípidos.
- Propiedades físicas: estudio reológico, calorimetría diferencial de barrido, difracción de rayos X, cristalinidad, propiedades microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido, óptica, confocal y fuerza atómica, espectroscopia infrarroja, tamaño de partícula, entre otras [13].

La importancia de la reología en el estudio de almidones con modificaciones duales

El objetivo principal de las modificaciones es observar los efectos de manera directa o indirecta de cómo las distintas meto-

dologías de modificación dual benefician las propiedades físicas y funcionales con respecto a las del almidón nativo. Una determinación que de manera indirecta da resultados del comportamiento después de la modificación es la reología. La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de los materiales, siendo una rama de la mecánica del medio continuo que observa la relación entre el esfuerzo y la deformación en condiciones de flujo impuestas al material [14, 15]. Es decir, para observar la respuesta de las alteraciones intermoleculares después de una modificación homo dual por método químico-químico, donde el resultado esperado es un incremento de la respuesta viscosa en dispersiones de almidón gelatinizado, se realiza la prueba de flujo cortante simple en estado estacionario en un sistema reométrico (cono y plato 2°) (Figura 5).

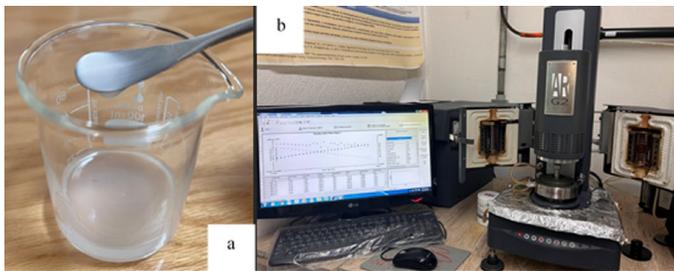


Figura 5a. Muestra de almidón modificado dualmente por método químico-químico 5b. Determinación de comportamiento al flujo en un reómetro de esfuerzo controlado ARG2

Las curvas de viscosidad respecto al flujo de los almidones modificados dan información de la repuesta viscosa al ser sometidos a esfuerzos cortantes y rapidezces de deformación, dichos datos pueden ajustarse a un modelo reológico que describa su comportamiento. En el caso de la Figura 6, los datos se ajustan a la ley de la potencia donde los parámetros reológicos de dicho modelo sugieren qué tratamiento presenta

mayor estabilidad de la matriz polimérica al flujo, esto, posiblemente por los enlaces covalentes que se formaron durante la modificación química dual y el beneficio de las interacciones efectivas resultantes [12].

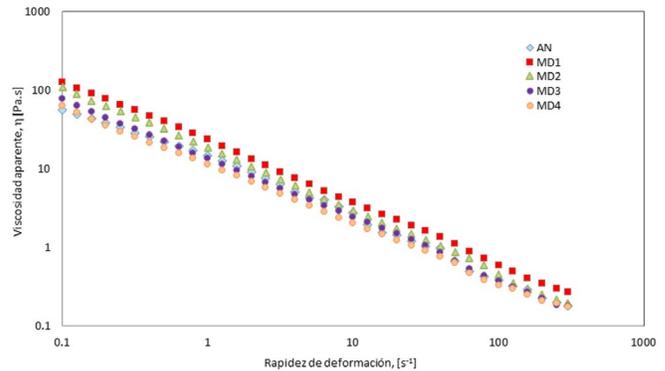


Figura 6. Curvas de flujo de almidones modificados dualmente ensayados a 4 niveles de concentración por métodos químicos; AN=almidón nativo; MD1=Almidón dualmente modificado 1; MD2=Almidón dualmente modificado 2; MD3=Almidón dualmente modificado 3 y MD4=Almidón dualmente modificado 4

Los parámetros reológicos del modelo de Ostwald de Waele o ley de potencia se muestran en la Tabla 2, donde se aprecia que el comportamiento de los fluidos es no newtoniano de tipo adelgazante para los diversos tratamientos. Lo anterior se expresa por los valores del índice del comportamiento al flujo $n < 1$ (0.2073 a 0.3819). Los datos del índice de consistencia (K) son directamente proporcionales al valor de la viscosidad y se observa que el tratamiento 1 (MD1) exhibió una viscosidad 1.6 veces mayor que el almidón nativo, esto debido a que conforme incrementa la concentración de los reactivos modificantes incrementa el número de enlaces covalentes entre las cadenas poliméricas del almidón, lo que sugiere distintos rearrreglos moleculares para cada tratamiento.

Estos parámetros permiten seleccionar de manera inicial un tratamiento con respecto a los otros ensayados mediante los cam-

Tratamiento	Viscosidad η (Pa.s)	K (Pa.s ⁿ)	n	R ²
AN	16.78	14.89	0.3819	0.9866
MD1	28.04	27.57	0.2298	0.9937
MD2	18.72	18.22	0.2073	0.9843
MD3	14.09	13.46	0.2372	0.9847
MD4	11.53	11.18	0.2554	0.9817

Tabla 2. Parámetros reológicos de almidones dualmente modificados por métodos químicos AN=almidón nativo; MD1=Almidón dualmente modificado 1; MD2=Almidón dualmente modificado 2; MD3=Almidón dualmente modificado 3 y MD4=Almidón dualmente modificado 4; K=índice de consistencia; n=índice de comportamiento al flujo y R²= coeficiente de determinación

bios en la viscosidad, después de la doble modificación al almidón nativo, indicando si se favorece o no la estabilidad de la matriz polimérica. Estos resultados, sumados a otras determinaciones físico-químicas (como pruebas reológicas oscilatorias, rayos X, cristalinidad, potencial z, tamaño de partícula, espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, grado de sustitución, propiedades funcionales, entre otras), caracterizarán y confirmarán qué modificación es la más adecuada para ser sujeta a cierta aplicación a condiciones impuestas [15, 16].

Posteriormente, es necesario que (una vez seleccionada la modificación dual con las propiedades físicas, químicas y funcionales adecuadas para la obtención de un biomaterial específico) durante el diseño de este biomaterial se realice todo el estudio reológico de las propiedades viscosas, viscoelásticas y elásticas. Las anteriores (asociadas con otras determinaciones específicas para caracterizar al biomaterial) contribuirán al procesamiento óptimo del mismo.

Aplicaciones de almidones modificados dualmente en biomateriales

Englobando todos los beneficios que posee el almidón nativo (y sus modificaciones con propiedades que les permiten participar en el diseño de biomateriales) se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas a las industrias farmacéutica, alimentaria y médica (Tabla 3). Se han obtenido excelentes resultados para continuar implementando esta línea de investigación con beneficios para la salud humana.

Conclusiones

El diseño y aprovechamiento de los almidones modificados dualmente a partir de fuentes convencionales y no convencionales permite ampliar la gama de aplicaciones en la industria, de acuerdo con las nuevas propiedades que estos exhiben. Estos almidones disminuyen costos de producción al otorgar mejores propiedades físicas, químicas y funcionales en los procesos en los que se emplean, evitando que se requiera emplear otro aditivo, sustancia o compuesto. Su participación en el área

Industria	Modificaciones	Fuente de almidón	Referencia	Función	Aplicación
Farmacéutica	Ácida/ química	Tapioca	Oladzadabbasabadi et al., (2017)	Materiales biocompatibles y biodegradables.	Cápsulas duras y recubrimiento de productos farmacéuticos.
	Doble entrecruzamiento	Maíz	Yun, et al., (2022)	Sistemas de administración de fármacos. Acumulación selectiva en tejido canceroso (solubilidad del fármaco liposoluble en medio acuoso).	Encapsulación de medicamentos hidrófobos (vitaminas y quimioterapia). Micelas (fármacos antitumorales con liberación controlada y sostenida).
	Enzimática/química	Maíz	Zhi et al., (2021)	Encapsulación de aceites y compuestos funcionales. Soporte de fármacos.	Nanoesferas funcionales.
	Entrecruzamiento	Varias fuentes	Davidovich-Pinhas, (2016)	Apoyo a la regeneración de la piel.	Biogeles. Parches y apósitos.
	Térmica/química	Trigo	Chen et al., (2023)	Encapsulación de ácidos grasos poliinsaturados.	Microcápsulas funcionales.
Alimentaria	Entrecruzamiento/químico	Papa	Bajer y Burkowska, (2022)	Empaques biodegradables (disminución de la huella ecológica).	Bioplásticos.
	Doble entrecruzamiento	Maíz	Peidayesh et al., (2021)	Almidón termoplástico.	Utensilios comestibles y envolturas.
	Físico/químico; Entrecruzamiento/químico	Papa, maíz, trigo, yuca	Zhou et al., (2014); Zhang et al., (2022)	Empaques funcionales nutraceuticos con mezcla de polímeros.	Biopelículas con compuestos bioactivos, marcadores y polímeros (antioxidantes, bacteriostáticos, detectores de maduración, conservadores, mucílagos, ácido poliláctico, alcohol polivinílico, policaprolactona, entre otros).

	Doble entrecruzamiento	Yuca, varios	Sriprabhom et al., (2023); Chen et al., (2023)	Emulsificantes, espesantes y estabilizadores.	Aditivos alimentarios para emulsiones, suspensiones, productos enlatados, congelados y refrigerados.
	Entrecruzamiento/térmico	Maíz	Liu et al., (2021)	Oleogeles anfífilicos bioaccesibles, sustitutos de grasas.	Texturizantes para muffins, masa para galletas, pasteles, untables, chocolate (reducido en grasa), queso, mantecas comerciales o sucedáneos de la margarina y productos cárnicos (salchichas, hamburguesas y paté de cerdo).
Médica	Enzimática/enzimática	Arroz	Zhou et al., (2014)	A partir de su metabolización, producción de ácidos grasos de cadena corta a nivel intestinal, disminución de lípidos, insulina y glucosa en suero, aumenta la eliminación de lípidos por heces fecales.	Fibra dietaria (almidones resistentes).

de biomateriales promueve el desarrollo de nuevas investigaciones que coadyuvan al beneficio del ser humano, con el fin de tener alternativas bioaccesibles, biocompatibles y biodegradables.

La Reología es de gran importancia para el estudio de los almidones con modificaciones duales debido a que facilita obtener un amplio conocimiento de su comportamiento viscoso y viscoelástico. Con ello, se pueden seleccionar de manera indirecta los tratamientos que presentan cambios a nivel molecular (micro) y que sugieren mayor estabilidad de las nuevas matrices poliméricas. Finalmente, los estudios reo-

lógicos contribuyen al diseño integral de biomateriales con fines específicos y en la manufactura de diversos equipos para su procesamiento, siendo de gran apoyo para el área científica y tecnológica.

Referencias

[1] Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., & Karim, A. A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398-404.

[2] Amukarimi, S., Ramakrishna, S., & Mozafari, M. (2021). Smart biomaterials - A proposed definition and overview of the field. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 19, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100311>

[3] Ogunsona, E., Ojogbo, E., & Mekonnen, T. (2018). Advanced material applications of starch and its derivatives. *European Polymer Journal*.

[4] Santana, A. L & Meireles, M. A. A. (2014). New Starches are the Trend for Industry Applications: A Review. *Food and Pu-*

- blic Health 4(5): 229-241. <https://doi.org/10.5923/j.fph.20140405.04>
- [5] Adewale, P., Yancheshmeh, M. S., & Lam, E. (2022). Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. *Carbohydrate Polymers*, 291, 119590. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>
- [6] Gałkowska, D., & Juszczak, L. (2019). Effects of amino acids on gelatinization, pasting and rheological properties of modified potato starches. *Food Hydrocolloids*, 92, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.063>
- [7] Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels - A Review. *RSC Advances*, 7(61), 38604-38630. <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>
- [8] Kurczewska, J. (2022). Recent Reports on Polysaccharide-Based Materials for Drug Delivery. *Polymers*, 14(19), 4189. <https://doi.org/10.3390/polym14194189>
- [9] Chen, K., & Zhang, H. (2020). Fabrication of Oleogels via a Facile Method by Oil Absorption in the Aerogel Templates of Protein-Polysaccharide Conjugates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(6), 7795-7804. <https://doi.org/10.1021/acsmi.9b21435>
- [10] Núñez-Bretón, L. C., Cruz-Rodríguez, L. C., Tzompole-Colohua, M. L., Jiménez-Guzmán, J., Perea-Flores, M. D. J., Rosas-Flores, W., & González-Jiménez, F. E. (2019). Physicochemical, functional and structural characterization of Mexican Oxalis tuberosa starch modified by cross-linking. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(4), 2862-2870. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00207-3>
- [11] Chimonyo, W., Fletcher, B., & Peng, Y. (2020). Starch chemical modification for selective flotation of copper sulphide minerals from carbonaceous material: A critical review. *Minerals Engineering*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.1065>
- [12] Omodunbi Ashogbon, A. (2020). Dual modification of various starches: Synthesis, properties and applications. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.1283>
- [13] Makroo, H., Naqash, S., Saxena, J., Sharma, S., Majid, D., & Dar, B. (2021). Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review. *Applied Food Research*, <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100001>.
- [14] Barnes, H. A., Hutton, J.F., & Walters, K. (1989). *An Introduction to Rheology*. Rheology Series, Book series. Elsevier, 3, 1-199.
- [15] Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. 1-428.
- [16] Bajer, D., & Burkowska-But, A. (2022). Innovative and environmentally safe composites based on starch modified with dialdehyde starch, caffeine, or ascorbic acid for applications in the food packaging industry. *Food Chemistry*, 374, 131639. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131639>