



REVIEW

Chemical modification of starch from fruit seeds: Methods, properties, and applications

Modificación química de almidón procedente de semillas de frutos: Métodos, propiedades y aplicaciones

Yulissa Ventura-Avalos¹ ; Rebeca Díaz-Soto¹ ; José Soriano-Colchado² ; Gabriela Barraza-Jáuregui^{1*} 

¹ Grupo de Investigación en Biopolímeros, nanomateriales y tecnología (GIBINTEC), Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, La Libertad, Perú.

² Universidad Privada Antenor Orrego, Av. América Sur 3145, Urb. Monserrate, Trujillo, La Libertad, Perú.

* Corresponding author: gbarraza@unitru.edu.pe (G. Barraza-Jáuregui).

Received: 15 January 2024. Accepted: 6 May 2024. Published: 13 May 2024.

Abstract

The fruit seeds, commonly regarded as waste after consuming the fresh pulp, emerge as a source of unconventional starch with innovative potential. This study focuses on highlighting the significance of these seeds by exploring chemical modification methods in this starch source that add value by transforming their properties. The review emphasizes the influence of key factors such as the type of chemical reagent, its concentration, reaction parameters (pH, temperature, time), and the botanical source of the seed on the degree of modification and the resulting morphological and functional properties of the starch. The importance of specific conditioning during the chemical modification process is underscored, as it significantly contributes to enhancing the properties of the modified starch derived from fruit seed. In this regard, new perspectives are opened to efficiently harness fruit seeds, turning them into a valuable source of starch with diverse applications in both the food and non-food industries.

Keywords: fruit seed; degree of substitution (DS); carbonyls; carboxyls; esterification; etherification; cross-linking.

Resumen

Las semillas de frutos, generalmente consideradas como residuos tras el consumo de la pulpa fresca, emergen como una fuente de almidón no convencional con potencial innovador. Este estudio se enfoca en resaltar la relevancia de estas semillas al explorar métodos de modificación química en esta fuente de almidón que aportan un valor añadido al transformar sus propiedades. La revisión subraya la influencia de factores clave, como el tipo de reactivo químico, su concentración, los parámetros de reacción (pH, temperatura, tiempo) y la fuente botánica de la semilla, en el grado de modificación y las propiedades morfológicas y funcionales resultantes del almidón. Se destaca la importancia del acondicionamiento específico durante el proceso de modificación química, ya que contribuye significativamente a mejorar las propiedades del almidón modificado a partir de semillas de frutos. En tal sentido, se abren nuevas perspectivas para aprovechar eficientemente las semillas de frutos, transformándolas en una valiosa fuente de almidón con aplicaciones diversas tanto en la industria alimentaria como en la no alimentaria.

Palabras clave: semilla de frutos; grado de sustitución (DS); carbonilos; carboxilos; esterificación; eterificación; entrecruzamiento.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.024>

Cite this article:

Ventura-Avalos, Y., Díaz-Soto, R., Soriano-Colchado, J., & Barraza-Jáuregui, G. (2024). Modificación química de almidón procedente de semillas de frutos: Métodos, propiedades y aplicaciones. *Scientia Agropecuaria*, 15(2), 311-325.

1. Introducción

El almidón es uno de los biopolímeros renovables más abundantes del planeta junto a la celulosa y es utilizado en diferentes industrias debido a su fácil adaptación, renovabilidad, bajo costo y su disponibilidad en múltiples fuentes (Aqil et al., 2017;

Khanoonkon et al., 2016). Estructuralmente el almidón es un poliglucano (polímero formado de unidades de D-glucosa), comprendido por amilosa (20%), amilopectina (80%) y una fracción pequeña (1% a 2%) de conformación no glucosídica como minerales y lípidos, composición que varía en

función de la procedencia botánica de la materia prima (Yepes, 2015). La amilosa es de estructura larga y lineal (Haq et al., 2019) compuesta aproximadamente por un 99% de enlaces α -(1,4) y el 1% de enlaces α -(1,6) glucosídicos, en cambio la amilopectina, presenta una estructura ramificada y contiene aproximadamente el 95% de enlaces α -(1,4) y 5% de enlaces α -(1,6) glucosídicos (Bertoft, 2017).

Muchos estudios han reportado las diversas propiedades del almidón proveniente de fuentes comerciales como tubérculos, cereales y legumbres (Guo et al., 2018), pero en países en vías de desarrollo, estos productos agrícolas se utilizan para alimentar a su población, por ende, los investigadores enfocan su atención en la extracción de almidón a partir de fuentes no convencionales (Jiménez-Hernández et al., 2011). Por tal motivo, en los últimos años se ha reportado a las semillas de frutos como fuentes novedosas, únicas y no convencionales de almidón, como las semillas de mango (*Mangifera indica* L.) (Musa & Sagagi, 2023; Ramírez-Brewer et al., 2024; Saleh et al., 2023; Yaowiwat et al., 2024), palta (*Persea americana*) (Alemu et al., 2022; Martins et al., 2022; Oluwajuyitan, 2024), níspero (*Eriobotrya japonica*) (Costa et al., 2022, 2023; Kong et al., 2023; Sharma et al., 2024; Tosif et al., 2023), Litchi (*Litchi chinensis*) (Esua et al., 2024; Kaur et al., 2023; Zhang et al., 2022), lúcuma (*Pouteria lúcuma*) (Alvarez-Yanamango et al., 2020), guaba (*Inga jinicuil*) (Aparicio-Saguilán et al., 2024), manzana malaya (*Syzygium malaccense*) (Santos et al., 2024), canistel (*Pouteria campechiana*) (Agama-Acevedo et al., 2022; Luo et al., 2023), tamarindo (*Tamarindus indica* L.) (Chandrasekar et al., 2024; Chowdhury et al., 2022; Einstein et al., 2020; Xie et al., 2022), yaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) (Kaur et al., 2024; Nguyen et al., 2022; Wong et al., 2021), durián (*Durio zibethinus*) (Apriani et al., 2022; Handayani et al., 2023), ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz) (Pech-Cohuo et al., 2021), longan (*Dimocarpus longan* Lour.) (Kittipongpatana et al., 2021; Manzoor & Ahmad, 2024), castaña (*Castanea sativa*) (Wang et al., 2020; Zhang et al., 2019), entre otras.

Las semillas de frutos son descartadas como residuos después del consumo de la pulpa fresca o durante el procesamiento, lo que genera un grave problema de contaminación a nivel industrial y medio ambiente (Thory & Sandhu, 2017; Zhang et al., 2016). Por consiguiente, si se aprovechan estas semillas, se minimizaría la contaminación generada por este subproducto y aumentará el valor agregado de los frutos. Por otro lado, el uso del almidón nativo presenta algunas limitaciones en cuanto a su

tendencia a la retrogradación, fragilidad, alta viscosidad, estabilidad térmica, el deterioro de sus propiedades mecánicas y su incompatibilidad con algunos polímeros y solventes (Haq et al., 2019). Por tal motivo, el almidón se modifica para optimizar las características estructurales y las propiedades funcionales para aplicaciones concretas (Lin et al., 2019).

Los diferentes métodos empleados para modificar las propiedades del almidón son del tipo físico, enzimático, químico y genético (Wang et al., 2020). El método más ampliamente utilizado es la modificación química, la cual implica la introducción de varios grupos funcionales en la estructura del almidón, como el acetilo, carboxilo e hidroxipropilo (Nawaz et al., 2020; Yu-Fang et al., 2018). En general, la modificación química puede clasificarse como oxidación, esterificación, reticulación, entre otros, siendo la fuente de almidón y las condiciones de reacción factores cruciales que influyen en el nivel de modificación generado en el almidón. En tal sentido, la modificación química del almidón es una estrategia eficiente para poder mejorar propiedades específicas en función a su uso particular (Adewale et al., 2022; Lewandowicz et al., 2022).

Por lo tanto, en este estudio se presenta una revisión de las investigaciones sobre la modificación química aplicada en almidón procedente de semillas de frutos y el efecto en sus propiedades morfológicas y funcionales, así como su potencial aplicación en diferentes industrias.

2. Modificación química de almidón aislado de semillas de frutos

La presencia de una gran cantidad de grupos hidroxilo en la estructura del almidón ofrece sitios activos para la realización exitosa de la modificación química (Fan & Picchioni, 2020). Este tipo de modificación implica la introducción de grupos funcionales al polímero de almidón, como el acetilo, carboximetilo, hidroxipropilo, carboxilo, amina y otros. Los nuevos grupos funcionales generan mejoras en propiedades funcionales, adaptando al almidón a aplicaciones alimentarias y no alimentarias específicas (Adewale et al., 2022; Ashogbon, 2021). Distintos métodos de modificación química se consiguen mediante descomposición, como la oxidación, o mediante derivatización, como la esterificación, esterificación y reticulación (Yu-Fang et al., 2018). Además, se genera un valor agregado al explotar y aprovechar a las semillas de frutos como fuente de almidón (Magallanes-Cruz et al., 2023). En la figura 1, se aprecia un esquema del proceso general que sigue una modificación química de un almidón nativo a partir de semilla de frutos.

2.1. Oxidación

En la oxidación química del almidón, los grupos hidroxilo de los polímeros de amilopectina y amilosa se oxidan a grupos carbonilo y carboxilo. En función del grado de oxidación también se puede producir una despolimerización parcial de la amilosa y la amilopectina (Vanier et al., 2017). Los agentes oxidantes que se utilizan comúnmente en el proceso de oxidación son el peróxido de hidrógeno, ácido crómico, hipoclorito de sodio, dióxido de nitrógeno, permanganato de potasio y persulfato de amonio (Halal et al., 2015).

Por lo general, el contenido de carbonilo (CO) y carboxilo (COOH) se emplean como indicadores del grado de oxidación del almidón. Este grado de alteración se ve influenciado por características intrínsecas (estructura molecular, fuente botánica, contenido de amilosa y el empaquetamiento de las laminillas cristalinas) del almidón y parámetros de reacción (tiempo, temperatura, pH, concentración y tipo reactivo oxidante) (Vanier et al., 2017).

Se han realizado diversos estudios de oxidación en almidón de semilla de frutos (Tabla 1) bajo diferentes parámetros de reacción, obteniendo así resultados con variados contenidos de carbonilo y carboxilo. Según estos estudios, el almidón a partir de semilla de frutos oxidado con hipoclorito de sodio (NaClO) tiende a formar un mayor contenido de carboxilos, presentando valores más altos cuando la concentración del NaClO es elevada, como el

caso del almidón de semilla de *Araucaria angustifolia* oxidado a una concentración de 3,50% (1,30% COOH) (Costa-Conto et al., 2011).

En contraste, cuando el almidón se oxida con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) tiende a formarse mayor contenido de carbonilos, como en almidón oxidado de semilla de *Artocarpus heterophyllus* Lam (1,060% CO) (Tung et al., 2021). Sin embargo, el almidón oxidado de semilla de *Mangifera indica* L. presentó un mayor contenido de carboxilos (Vellaisamy et al., 2021). Esta diferencia puede deberse al origen botánico del almidón y al tipo de agente oxidante que influyen en el contenido de carboxilos y carbonilos. Cabe resaltar que los trabajos de oxidación en almidón de semillas evaluados coinciden en que la reacción siempre se da a pH alcalino (8-11) y a temperaturas que varían de 30 a 40 °C, siendo considerados como parámetros óptimos.

2.1.1. Efecto de la oxidación en las propiedades morfológicas y funcionales

En la mayoría de los estudios, la oxidación con NaClO no afecta las propiedades morfológicas del gránulo, a excepción del almidón extraído de semillas de *Araucaria angustifolia* (Costa-Conto et al., 2011) y *Persea americana* (Lacerda et al., 2014) (Tabla 1). Esto estaría influenciado por la forma y tamaño que presentan los gránulos nativos de almidón de cada semilla de fruto, así como las condiciones de reacción durante la oxidación y la fuente de almidón (Spier et al., 2013).

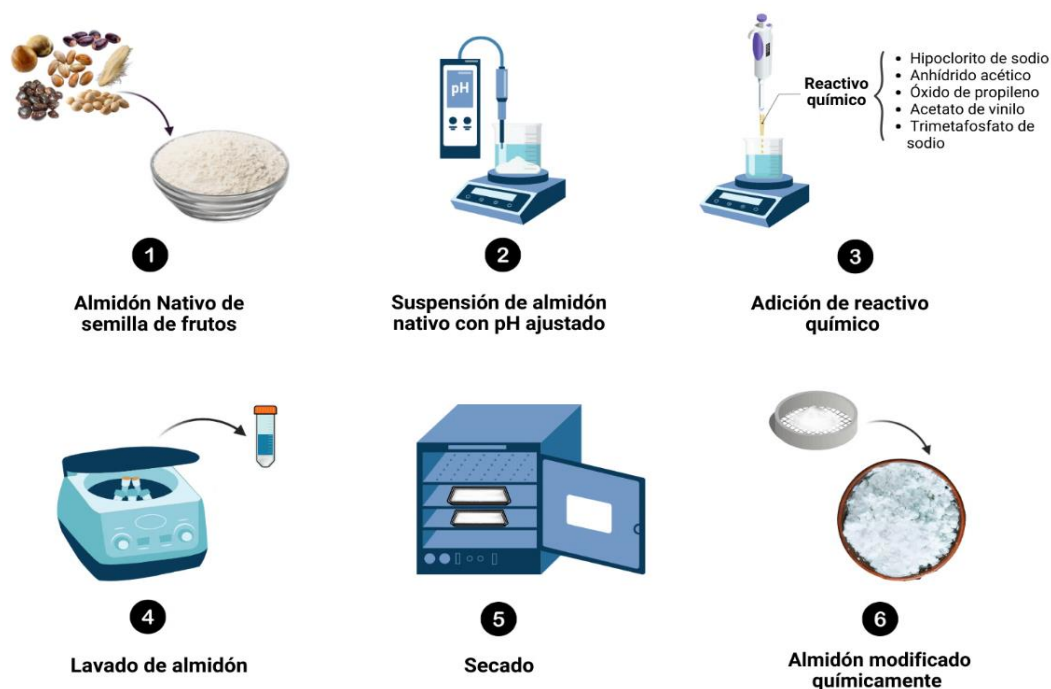


Figura 1. Proceso general de modificación química de un almidón nativo a partir de semillas de frutos.

Tabla 1

Condiciones de reacción y efecto en las propiedades morfológicas y funcionales de la oxidación en almidón proveniente de semillas de frutos

Semilla de fruto	Agente Oxidante	Concentración de agente oxidante (%)	Parámetros de Reacción			Contenido de carboxilo (%)	Contenido de carbonilo (%)	Efecto en propiedades morfológicas	Efecto en propiedades funcionales			Referencias
			T (°C)	pH	Tiempo (min)				IAA (g/g)	PH (g/g)	ISA (%)	
<i>Chrysophyllum albidum</i>	NaClO	10 ^a	-	9-9,5	30	0,340	0,280	Sin efecto	↓	↑	-	(Oderinde et al., 2023)
		1 ^b				0,091	0,025					
<i>Mangifera indica L.</i>	H ₂ O ₂	1,5 ^b	30	8	120	0,122	0,039	-	-	↑	↑	(Vellaisamy et al., 2021)
		2 ^b				0,117	0,043					
<i>Mangifera indica L.</i>	NaClO	10 ^c	30	9-9,5	10	0,090	0,050	Sin efecto	↑	↑	↑	(Mendes et al., 2012)
<i>Artocarpus heterophyllum Lam.</i>	H ₂ O ₂	2 ^b	40	9	90	0,290	1,060	Superficie rugosa y aparición de microporos	-	-	-	(Tung et al., 2021)
		1 ^c				0,070	0,040					
<i>Artocarpus heterophyllum Lam.</i>	NaClO	2 ^c				0,210	0,070	Sin efecto	-	↓	↑	(Naknaen et al., 2017)
		3 ^c	35	9,5	50	0,310	0,100					
		4 ^c				0,410	0,220					
		5 ^c				0,530	0,340					
<i>Amaranthus viridis</i>	NaClO	10,7 ^b	-	9-9,5	11,5	1,100	0,100	-	-	-	(Fasuan & Akanbi, 2018)	
<i>Araucaria angustifolia</i>	H ₂ O ₂	0,2 ^d						Sin efecto	-	-	-	(Homung et al., 2018)
		0,4 ^d										
	0,8 ^d	-	-	60	-	-						
	0,2 ^d											
<i>Araucaria angustifolia</i>	NaClO	0,4 ^d						Superficie irregular	↑	-	↑	(Costa-Conto et al., 2011)
		0,8 ^d										
<i>Brosimum alicastrum Swartz</i>	NaClO	3 ^a	35	11,6	75	0,098	-	Sin efecto	-	↓	↓	(Pérez-Pacheco et al., 2017)
<i>Tamarindus indica L.</i>	NaClO	1 ^a				0,069	0,016	Sin efecto	-	↓	↑	(Kaur & Bhullar, 2016)
		2 ^a	35	9,5	50	0,167	0,042					
		3 ^a				0,212	0,061					
		4 ^a				0,373	0,082					
<i>Persea americana</i>	NaClO	0,5 ^c				-	-	Disminución de la rugosidad granular	-	-	-	(Lacerda et al., 2014)
		1 ^c	30	9,5	50	-	-					
<i>Artocarpus altilis</i>	NaClO	6 ^a	-	9-9,5	300	-	-	Sin efecto	↑	↑	-	(Rincón et al., 2007)

Agentes oxidantes. NaClO-Hipoclorito de sodio, H₂O₂-Peróxido de hidrogeno, T-temperatura, IAA-índice de absorción de agua, PH-poder de hinchamiento, ISA-índice de solubilidad en agua, ^a- g de reactivo/ml de solución acuosa de almidón, ^b- ml de reactivo/ml de solución acuosa de almidón, ^c- g de reactivo/g de almidón, ^d- mol/L.

Por el contrario, el almidón de la semilla de *Artocarpus heterophyllus* Lam. oxidado con H_2O_2 presentó cambios notorios en la superficie de los gránulos (Tung et al., 2021), que se relacionaría con el tipo y concentración de agente oxidante. Esto guarda relación con la erosión que ocurre en la superficie del almidón durante el proceso de oxidación (Fonseca et al., 2015) y mayormente induce alteraciones en la superficie de los gránulos de almidón, en lugar de afectar sus dimensiones (Vanier et al., 2017). En la mayoría de los casos, la oxidación del almidón de semillas de frutos resultó en un incremento del índice de absorción de agua (IAA), a excepción de la semilla de *Chrysophyllum albidum* (Oderinde et al., 2023). Asimismo, se observó un aumento en el índice de solubilidad en agua (ISA), salvo en la semilla de *Brosimum alicastrum* Swartz (Pérez-Pacheco et al., 2017).

Estos cambios en el IAA e ISA pueden deberse a que, la oxidación ocasiona que se debiliten los grupos hidrofílicos en la amilosa y amilopectina, provocando un incremento en estas propiedades (Okekunle et al., 2020). Este efecto en el ISA después de la oxidación coincide con estudios en almidón oxidado de papa (Zhou et al., 2016) y maíz (Liu et al., 2014), los cuales son fuentes comerciales muy utilizadas a nivel industrial, por lo que el almidón oxidado a partir de semilla de frutos podría ser utilizado como sustituto de estos almidones.

El efecto de la oxidación en el almidón a partir de semillas de fruto en el poder de hinchamiento (PH) no presenta una tendencia fija. La oxidación ocasiona la desintegración estructural en los gránulos nativos del almidón, influyendo en la capacidad de retención de agua en las moléculas del almidón, propiedad que depende del tipo de especie botánica y la composición proximal del almidón de cada semilla de fruto (Chong et al., 2013).

2.1.2. Aplicaciones viables en la industria alimentaria y no alimentaria

Los almidones oxidados se emplean principalmente en la industria papelerá, donde se utilizan como adhesivos para recubrimiento y en el encolado de superficies. En la industria alimentaria, el almidón oxidado desempeña un papel importante como relleno en productos de panificación y como aditivo en rebozados (Vanier et al., 2017). En el ámbito farmacéutico, estos almidones facilitan la liberación de sustancias activas en sistemas de administración de medicamentos (Masina et al., 2017) y también encuentran aplicaciones en la industria textil (Simsek et al., 2012). La demanda de su empleo en estas industrias se atribuye al efecto beneficioso de la oxidación, que incluyen un aumento en la

solubilidad, capacidad de retención de agua y estabilidad del almidón, como resultado de la conversión de grupos hidroxilos a grupos carboxilos en las cadenas internas (Halal et al., 2015).

Las características previamente mencionadas se corroboran con la oxidación observada en el almidón de semillas de *Mangifera indica* L. (Mendes et al., 2012), *Artocarpus heterophyllus* Lam (Naknaen et al., 2017), *Araucaria angustifolia* (Costa-Conto et al., 2011) y *Tamarindus indica* L. (Kaur & Bhullar, 2016). Esto sugiere la idoneidad y viabilidad de aplicar estos almidones en productos que demanden baja viscosidad y estabilidad durante el almacenamiento en frío (Vanier et al., 2017). Desde una perspectiva sostenible, Vellaisamy et al. (2021) demostraron que el almidón oxidado de semillas de *Mangifera indica* L. genera películas homogéneas, claras, flexibles y con buena resistencia mecánica y elongación en el punto de ruptura.

2.2. Esterificación

La esterificación del almidón consiste en la conversión de los tres grupos hidroxilo disponibles en la unidades de glucosa a un derivado alquilo o arilo (Masina et al., 2017). Se puede lograr la formación de ésteres en el almidón en presencia de derivados de ácidos orgánicos (anhídridos, cloruros) o inorgánicos (fosfato, sulfato) (Chen et al., 2015) y bajo la acción de un catalizador como el hidróxido de sodio (Lin et al., 2017), yodo y ácido sulfúrico (Babić et al., 2007). El nivel de esterificación generado en el almidón se mide con el grado de sustitución (DS), que indica la cantidad de grupos hidroxilo que han sido reemplazados en la unidad de glucosa. El DS puede variar entre 0 y 3, en donde un valor de 3 indica que se han sustituido todos los grupos hidroxilo posibles (Yu-Fang et al., 2018). Existe varios métodos de esterificación, siendo uno de los más comunes y evaluados, la acetilación, que se logra con la introducción de grupos acetilo en la estructura del almidón, empleándose reactivos como anhídrido acético ($C_4H_6O_3$), ácido acético ($C_2H_4O_2$) y acetato de vinilo ($C_4H_6O_2$) (Haq et al., 2019). El DS en el almidón acetilado se puede considerar bajo (0,01-0,1 DS) (Elomaa et al., 2004), medio (0,1-0,3 DS) (Pu et al., 2011) y alto (2-3 DS) (Singh et al., 2007). En la **Tabla 2**, se observa que los almidones acetilados con anhídrido acético presentaron un DS de nivel medio, siendo el de mayor valor el reportado para almidón modificado de semilla de *Chrysophyllum albidum* (0,148-0,158 DS) (Ibikunle et al., 2019), además no se notó grandes diferencias en los valores de DS al acetilar con acetato de vinilo como en el caso de la semilla de *Aesculus indica* (0,040-0,100 DS) (Shubeena et al., 2015).

Tabla 2

Condiciones de reacción y efecto en las propiedades morfológicas y funcionales de la esterificación en almidón de semillas de frutos

Semilla de fruto	Agente Esterificante	Concentración de agente esterificante (%)	Parámetros de Reacción			DS	Efecto en propiedades morfológicas	Efecto en propiedades funcionales			Referencias
			T (°C)	pH	Tiempo (min)			IAA (g/g)	PH (g/g)	ISA (%)	
<i>Chrysophyllum albidum</i>	C ₄ H ₆ O ₃	10 ^a	-	8-8,5	5	0,062	Sin efecto	↑	↑	-	(Oderinde et al., 2023)
<i>Chrysophyllum albidum</i>	C ₄ H ₆ O ₃	5 ^a	-	8-8,5	5	0,148	-	↑	↑	↑	(Ibikunle et al., 2019)
		15 ^a	-	8-8,5	5	0,158					
<i>Litchi chinensis</i> Sonn.	C ₆ H ₈ O ₇	20 ^b 40 ^b	-	-	-	-	Superficie irregular	↑	↓	↓	(Kaur et al., 2023)
<i>Persea americana</i>	C ₂ H ₄ O ₂	5 ^b	-	8-8,5	-	0,018	-	↓	↑	↓	(Navarrete-Tumbaco et al., 2023)
<i>Persea americana</i>	C ₄ H ₆ O ₃	10,2 ^a	-	8-8,5	60	0,070	Gránulos con forma de campana y superficie con algunas estrias	↓	↓	↑	(Alves et al., 2017)
<i>Bixa orellana</i> L.	C ₁₂ H ₁₈ O ₃ (OSA)	9 ^a	25	-	-	0,003	Sin efecto	-	-	-	(Silva et al., 2022)
<i>Ginkgo biloba</i>	C ₁₂ H ₁₈ O ₃ (OSA)	-	-	-	-	0,006	Superficie irregular	-	-	-	(Chen et al., 2022)
<i>Ginkgo biloba</i>	C ₁₂ H ₁₈ O ₃ (OSA)	1,50 ^b	35	8,5	480	0,006	-	-	-	-	(Zheng et al., 2017)
		3 ^b	35	8,5	480	0,017					
<i>Castanea sativa</i>	C ₄ H ₆ O ₃	12 ^c	30	8-8,5	60	0,090	-	-	-	-	(Oh et al., 2019)
		3 ^a	30	8-8,5	60	0,040					
<i>Aesculus indica</i>	C ₄ H ₆ O ₂	6 ^a	-	8-8,5	60	0,090	Aglomeración de gránulos	↑	↑	↑	(Shubeena et al., 2015)
		9 ^a	-	8-8,5	60	0,100					
<i>Mangifera indica</i> L.	C ₁₂ H ₁₈ O ₃ (OSA)	3 ^b	35	8,5	120	0,044	Aumento de tamaño de gránulo	-	-	-	(Ferraz et al., 2019)
<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	C ₂ H ₄ O ₂ S	10 ^b	50	-	180	1,460	Sin efecto	↑	↓	↓	(Das & Das, 2019)
<i>Agliaia</i> sp	C ₂ H ₄ O ₂	-	-	8-8,4	120	-	-	-	-	-	(Rahman et al., 2017)
<i>Artocarpus altilis</i>	C ₄ H ₆ O ₃	10,2 ^a	-	8-8,5	-	-	Sin efecto	↑	↑	↑	(Rincón et al., 2007)

Agentes esterificantes. *C₄H₆O₃-Anhidrido acético, C₂H₄O₂-Ácido acético, C₁₂H₁₈O₃ (OSA)-Anhidro octenil succínico, C₄H₆O₂-Acetato de vinilo, C₆H₈O₇-Ácido cítrico, C₂H₄O₂S-Ácido tioglucólico, DS-grado de sustitución, ^a - g de reactivo/g de almidón, ^b - ml de reactivo/ml de solución acuosa de almidón, ^c - g de reactivo/g de solución acuosa de almidón.

Tabla 3

Condiciones de reacción y efecto en las propiedades morfológicas y funcionales de la eterificación en almidón a partir de semillas de frutos

Semilla de fruto	Agente Eterificante	Concentración de agente Eterificante (%)	Parámetros de Reacción			DS	MS	Efecto en propiedades morfológicas	Efecto en propiedades funcionales			Referencias
			T (°C)	pH	Tiempo (min)				IAA (g/g)	PH (g/g)	ISA (%)	
<i>Chrysophyllum albidum</i>	C ₂ H ₃ ClO ₂ (MCA)	5 ^a	-	-	-	0,017	-	-	↑	↑	↑	(Ibikunle et al., 2019)
		10 ^a	40	7	60	0,029						
		15 ^a	40	7	60	0,036						
<i>Mangifera indica</i> L.	C ₂ H ₂ ClNaO ₂ (SMCA)	2 ^b	30	-	180	0,308	-	-	-	-	(Agwamba et al., 2018)	
<i>Mangifera indica</i> L.	C ₂ H ₂ ClNaO ₂ (SMCA)	2 ^b	30	-	-	0,299	-	-	↑	↓	(Agwamba et al., 2016)	
<i>Mangifera indica</i> L.	C ₂ H ₂ ClNaO ₂ (SMCA)	2 ^b	30	-	120	0,308	-	-	-	-	(Hassan et al., 2015)	
<i>Artocarpus heterophyllus</i> L.	C ₂ H ₃ ClO ₂ (MCA)	1 ^b	50	-	90	0,680	Superficie agrietada con agujeros alveolares	-	-	-	(Van et al., 2021)	
<i>Lagenaria siceraria</i>	C ₂ H ₃ ClO ₂ (MCA)	5 ^c	-	-	-	0,410	Superficie arrugada y rugosa	-	↑	-	-	(Kulkarni et al., 2013)
		10 ^c	40	-	240	0,570						
		15 ^c	40	-	240	0,880						
<i>Castanea sativa</i>	C ₃ H ₆ O (PO)	12 ^d	45	11,50	1440	0,050	-	-	-	-	(Oh et al., 2019)	
<i>Artocarpus heterophyllus</i> L.	C ₃ H ₆ O (PO)	5 ^e	40	11,15	1440	-	0,050	Presencia de algunas trazas en la superficie del gránulo	-	↑	↑	(Naknaen, 2014)
		10 ^e	40	11,15	1440	-	0,060					
		20 ^e	40	11,15	1440	-	0,100					
		30 ^e	40	11,15	1440	-	0,120					
		40 ^e	40	11,15	1440	-	0,140					
50 ^e	40	11,15	1440	-	0,140							

Agentes eterificantes. * C₂H₃ClO₂ (MCA)- Ácido monocloroacético, C₂H₂ClNaO₂ (SMCA)- Monocloroacetato de sodio, C₃H₆O (PO)-Óxido de propileno, MS-sustitución molar, ^a - g de reactivo/g de almidón, ^b - mol/L, ^c - g de reactivo/ml de solución acuosa de almidón, ^d - g de reactivo/g de solución acuosa de almidón, ^e - ml de reactivo/ml de solución acuosa de almidón.

Por otro lado, en la acetilación con ácido acético, el almidón modificado de semilla de *Persea americana* presentó el DS más bajo (0,018 DS) (Navarrete-Tumbaco et al., 2023). En la acetilación, la cantidad de grupos acetilo añadidos a la molécula, así como la velocidad y eficiencia de la reacción, están influenciados por factores como el tipo de reactivo y su concentración, el pH, la temperatura, el método de extracción de almidón y las características de su estructura de gránulo nativo (Bello-Pérez et al., 2010).

Otra alternativa para la esterificación del almidón implica el uso de anhídrido octenil succínico (OSA). Al examinar la **Tabla 2**, se observa que los almidones de semillas tratados con este reactivo presentaron un bajo grado de sustitución (DS), siendo el almidón modificado de semilla de *Bixa orellana* L. el que registró el valor más bajo, con un DS de 0,003 (Silva et al., 2022). En contraste, al realizar la esterificación con ácido tioglicólico en almidón modificado de semilla de *Artocarpus heterophyllus* Lam., se alcanzó el nivel más alto de DS, con un valor de 1,460 (Das & Das, 2019). Estos hallazgos sugieren que la naturaleza y concentración del reactivo, combinadas con factores como tiempo, temperatura y origen botánico de la semilla, desempeñan un papel crucial en la determinación del grado de sustitución (DS) en almidones de semillas de frutos sometidos a modificaciones por esterificación.

2.2.1. Efecto de la esterificación en las propiedades morfológicas y funcionales

De acuerdo con la **Tabla 2**, las propiedades morfológicas de la mayoría de los almidones de semillas acetilados con anhídrido acético permanecieron inalteradas después de la modificación, con excepción del almidón modificado de semilla de *Persea americana* (Alves et al., 2017). Esta diferencia podría atribuirse a las variaciones en el tamaño de gránulo entre las diferentes fuentes. En contraste, los almidones esterificados con anhídrido octenil succínico (OSA) mostraron cambios significativos en la estructura y dimensiones del gránulo de almidón, especialmente cuando su grado de sustitución (DS) era más elevado, como se evidencia en el almidón de la semilla de *Mangifera indica* L., que experimentó un aumento en el tamaño del gránulo (Ferraz et al., 2019). La reacción con OSA induce la hinchazón del almidón, resultando en un aumento de tamaño y la formación de poros en el gránulo de almidón modificado (Bai & Shi, 2011).

Una parte considerable de los almidones esterificados exhibió un aumento en el Índice de Absorción de Agua (IAA). Este fenómeno puede atribuirse a la

introducción de grupos éster en la molécula de almidón, generando un desorden intragranular que facilita el acceso del agua a la región amorfa del almidón (Zięba et al., 2011); como es el caso de los almidones modificados de semilla de *Persea americana* (Alves et al., 2017; Navarrete-Tumbaco et al., 2023). En los casos de los almidones esterificados de semilla de *Litchi chinensis* Sonn. (Kaur et al., 2023) y *Artocarpus heterophyllus* Lam (Das & Das, 2019), tratados con ácido cítrico y tioglicólico, respectivamente, se observó una disminución en el ISA y el PH. Cada grupo funcional de los reactivos antes mencionados, parece modificar las interacciones internas entre las cadenas de amilosa y amilopectina del almidón, provocando una reducción en la capacidad de hinchamiento y solubilidad (Kumar et al., 2014).

En el caso de almidones acetilados se presentó un aumento de ISA y PH. El grupo acetilo es de mayor tamaño, con nubes de electrones más expansivas en comparación con el grupo OH (Wiberg & Rablen, 1993), dando como resultado una repulsión entre las moléculas de almidón, facilitando así la percolación del agua entre las cadenas (Singh et al., 2007). Esto trae como consecuencia que la solubilidad y el poder de hinchamiento se incrementen, mejorando la lixiviación de amilosa (Muljana et al., 2010). En consecuencia, los almidones acetilados derivados de semillas de frutos, al exhibir un incremento en sus propiedades funcionales, podrían contribuir a mejorar la estabilidad de la viscosidad del gel y a reducir la opacidad (Haq et al., 2019). Estas características los posicionan como aditivos prometedores para su utilización como sustitutos de almidón proveniente de fuentes convencionales.

2.2.2. Aplicaciones viables en la industria alimentaria y no alimentaria

El uso predominante del almidón esterificado de bajo grado de sustitución (DS) se evidencia en la industria alimentaria, donde actúa como mejorador de textura, estabilidad y consistencia (Bello-Pérez et al., 2010). Específicamente, se permite la utilización de almidones acetilados según las regulaciones de la FDA, con un DS máximo de 0.2 (Han et al., 2012), para aplicaciones en alimentos como estabilizantes, espesantes y agentes gelificantes en aderezos, pasteles, salsas, rellenos, mayonesas y pudines instantáneos (Bello-Pérez et al., 2010). Dentro de los límites permitidos se encuentran los almidones acetilados de semillas de *Chrysophyllum albidum* (Ibikunle et al., 2019; Oderinde et al., 2023), *Persea americana* (Alves et al., 2017; Navarrete-Tumbaco et al., 2023), *Castanea sativa* (Oh et al., 2019) y *Aesculus indica* (Shubeena et al., 2015), posicionándolos

como aditivos potenciales para su aplicación en la industria.

Mientras que, el almidón esterificado con un DS alto, se usa en industrias no alimentarias como en filtros de cigarrillos, aglutinantes de tabletas, recubrimientos, adhesivos y en materiales de empaques biodegradables (Han et al., 2012; Saartrat et al., 2005). Además, se han realizado estudios aplicativos como los de Navarrete-Tumbaco et al. (2023) que elaboraron bioplástico a partir de almidón acetilado de semilla de *Persea americana*, con un buen índice de absorción de agua y humedad, haciéndolo no higroscópico; y Das & Das (2019) que determinaron que el almidón esterificado de la semilla de *Artocarpus heterophyllus* Lam. es un candidato conveniente para la administración de fármacos colónicos.

2.3. Eterificación

La eterificación del almidón se refiere a la sustitución de grupos hidroxilo en la unidad de glucosa por grupos carboximetilo, hidroxipropilo y otros grupos a través de la formación de un enlace éter (ROR) (Masina et al., 2017). El grado de modificación también se mide con el DS, pero adicionalmente también con la sustitución molar (MS) que se usa mayormente en la hidroxipropilación (Yu-Fang et al., 2018).

En la **Tabla 3** se muestran almidones hidroxipropilados de semillas de *Castanea sativa* y *Artocarpus heterophyllus* L., los cuales fueron modificados con óxido de propileno (PO), y presentaron un bajo grado de sustitución con valores de 0,050 DS y 0,050-0,140 MS, respectivamente (Naknaen, 2014; Oh et al., 2019). Estos bajos niveles de sustitución se encuentran dentro de lo estipulado por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA), para un nivel máximo permisible de sustitución no superior a 0,20 (Naknaen, 2014). De igual modo, otro grupo eterificante mayormente preferido es el carboximetil, que es elegido por su velocidad de reacción y simplicidad. La carboximetilación se logra mediante un proceso de dos pasos, en el cual el almidón nativo, generalmente activado con NaOH, reacciona con ácido monocloroacético (MCA) o su sal derivada a través de la síntesis de éter de Williamson para obtener un almidón carboximetilado (Heinze et al., 2004). El almidón carboximetilado de las semillas de frutos, presentan un DS elevado, a excepción de la semilla de *Chrysophyllum albidum* con valores bajos de 0,036 a 0,017 DS (Ibikunle et al., 2019). Diversos factores, como las condiciones de la reacción, el tipo de disolvente orgánico, la cantidad de MCA, el tiempo de reacción, la temperatura y el origen botánico del almidón; tienen un

impacto importante en el grado total de sustitución en el almidón carboximetilado (Mollega et al., 2011). Complementariamente, se menciona que la reacción de eterificación de los almidones de semillas, se trabajaron a tiempos y temperaturas mayores a 60 min y 30 °C, respectivamente.

2.3.1. Efecto de la eterificación en las propiedades morfológicas y funcionales

La **Tabla 3** deja ver que las propiedades morfológicas se ven afectadas por la adición de nuevos grupos (hidroxipropil y carboximetil) durante la eterificación, presentando alteraciones en las superficies del gránulo. Resultados de investigaciones similares se determinaron en almidón de yuca (Sangseethong et al., 2005) y papa (Kaur et al., 2004). Durante la eterificación, los gránulos de almidón a partir de semilla se ven expuestos a soluciones alcalinas fuertes, lo que resulta en la deformación de su superficie y provoca la descomposición granular. Esto confirma que este método de modificación afecta únicamente la superficie del gránulo y no altera la estructura interna del gránulo de almidón (Van et al., 2021).

Por otro lado, se observa un incremento en las propiedades funcionales como resultado de la eterificación en la gran mayoría de almidones. La introducción de grupos hidroxipropilo, carboximetilo y/o similares en la estructura del almidón provoca una reorganización estructural debido a las obstrucciones generadas por estos grupos. Este fenómeno conlleva a una repulsión entre las moléculas de almidón, facilitando, a su vez, un aumento en la penetración del agua en los gránulos de almidón tras la modificación. Como consecuencia, se observa una mejora en la capacidad del almidón modificado para absorber más agua, hincharse y solubilizarse a medida que aumenta el grado de sustitución en la eterificación (Ibikunle et al., 2019). Este efecto también fue evidente en los almidones eterificados de yuca (Mollega et al., 2011) y plátano (Lawal et al., 2008).

Por lo cual, el almidón de semilla de fruto eterificado al presentar efecto en sus propiedades morfológicas y funcionales al igual que un tipo de almidón industrializado, ampliaría su aplicación y hasta la sustitución de almidones de fuentes tradicionales.

2.3.2. Aplicaciones viables en la industria alimentaria y no alimentaria

Los almidones eterificados al aumentar su DS, provoca un aumento en sus propiedades funcionales (Zhou et al., 2007), por lo cual los hace esenciales para su aplicación en las industrias farmacéutica, textil, agrícola, medioambiental y alimentaria (Van

et al., 2021). Está relación coincide con las investigaciones de los almidones de semillas de frutos eterificados revisados en el presente estudio, por este motivo podrían ser buenos prospectos para su aplicación en estas industrias.

2.4. Entrecruzamiento (Cross-linking)

El entrecruzamiento consiste en reemplazar los enlaces de hidrógeno intramoleculares e intermoleculares por enlaces covalentes entre los grupos hidroxilo del almidón y compuestos multifuncionales que actúan como puentes. Esto da como resultado una molécula más grande, más estable y resistente (Singh et al., 2007). Los principales reactivos entrecruzantes son el trimetafosfato de sodio (STMP), el cloruro de fosforilo (POCl₃), el tripolifosfato de sodio (STPP), la epíclorhidrina (EPI), el fosfato monosódico (SOP), mezclas entre STMP y STPP o ácido adípico y anhídrido acético (Olawoye et al., 2023) (Tabla 4).

El DS de los almidones de semillas entrecruzados es bajo, siendo el de menor valor el de la semilla de *Persea americana* (0,0006 DS) (Alves et al., 2013). Debido a la permanencia de los puentes covalentes en el entrecruzamiento, solo se requiere un DS pequeño, generalmente un enlace de entrecruzamiento por cada 100 a 3000 unidades de anhidroglucosa en el almidón, para lograr efectos significativos (Yu-Fang et al., 2018). Adicionalmente, el DS del entrecruzamiento del almidón se ve afectado directamente por factores clave como la composición y concentración del reactivo, la temperatura, el tiempo, el pH y la

composición química de la fuente del almidón nativo (Chung et al., 2004).

El pH básico (10-11) y el tiempo (1-3 h) al cuál se trabajan durante la reacción del entrecruzamiento de los almidones de semilla de frutos, indican ser parámetros de reacción estándar durante la modificación por entrecruzamiento.

2.4.1. Efecto del entrecruzamiento en las propiedades morfológicas y funcionales

Los cambios que genera el entrecruzamiento en la morfología de los gránulos de almidones de semilla de frutos (Tabla 4) es variable y se puede observar que el agente entrecruzante juega un rol importante en esta propiedad. Como el caso del almidón modificado de semilla de *Durio zibethinus* que presentó rayaduras y perforaciones en la superficie del gránulo (Yusoff et al., 2018). Mientras que, el almidón modificado de semilla de *Persea americana* solo presentó una disminución del tamaño del gránulo en comparación con el almidón nativo (Cornelia & Christianti, 2018).

En cuanto a las propiedades funcionales, el proceso de entrecruzamiento induce una reducción en el Índice de Absorción de Agua (IAA), el pH y el Índice de Solubilidad en Agua (ISA) en la mayoría de los almidones entrecruzados derivados de semillas. La introducción de grupos fosfato refuerza los enlaces de hidrógeno en las moléculas del gránulo de almidón, lo que resulta en una menor hinchazón y una disminución en la solubilidad en comparación con el almidón nativo (Alves et al., 2013).

Tabla 4
Condiciones de reacción y efecto en las propiedades morfológicas y funcionales del entrecruzamiento en almidón de semillas de frutos

Semilla de fruto	Agente Entrecruzante	Concentración de agente entrecruzante (%)	Parámetros de Reacción			DS	Efecto en propiedades morfológicas	Efecto en propiedades funcionales			Referencias
			T (°C)	pH	Tiempo (min)			IAA (g/g)	PH (g/g)	ISA (%)	
<i>Artocarpus altilis</i>	Na ₃ P ₃ O ₉ (STMP) y Na ₅ P ₃ O ₁₀ (STPP)	4 ^a (99:1)	45	10,5	60	0,0009	-	↑	-	↑	(Amorim et al., 2021)
<i>Castanea sativa</i>	Na ₃ P ₃ O ₉ (STMP) y Na ₅ P ₃ O ₁₀ (STPP)	12 ^a (99:1)	45	11,5	180	0,9210	-	-	↓	↓	(Oh et al., 2019)
<i>Persea americana</i>	Na ₅ P ₃ O ₁₀ (STPP)	6 ^a	45	10,5	60	-	Disminución del tamaño de gránulo	-	↓	↓	(Cornelia & Christianti, 2018)
<i>Persea americana</i>	Na ₃ P ₃ O ₉ (STMP) y Na ₅ P ₃ O ₁₀ (STPP)	12 ^a (99:1)	45	11	180	0,0006	Sin efecto	↓	↓	↓	(Alves et al., 2013)
<i>Durio zibethinus</i>	C ₃ H ₅ ClO (ECH)	1,3 ^b	25	-	1080	-	Superficie rugosa, con rayadura y huecos	-	-	-	(Yusoff et al., 2018)
<i>Aglaiia sp</i>	Na ₅ P ₃ O ₁₀ (STPP)	5 ^a	-	11	60	-	-	-	-	-	(Rahman et al., 2017)

Agentes entrecruzantes. * Na₃P₃O₉ (STMP)- Trimetafosfato de sodio, Na₅P₃O₁₀ (STPP)- Tripolifosfato de sodio, C₃H₅ClO (ECH)- Epíclorhidrina, ^a-g de reactivo/g de almidón, ^b- ml de reactivo/ml de solución acuosa de almidón.

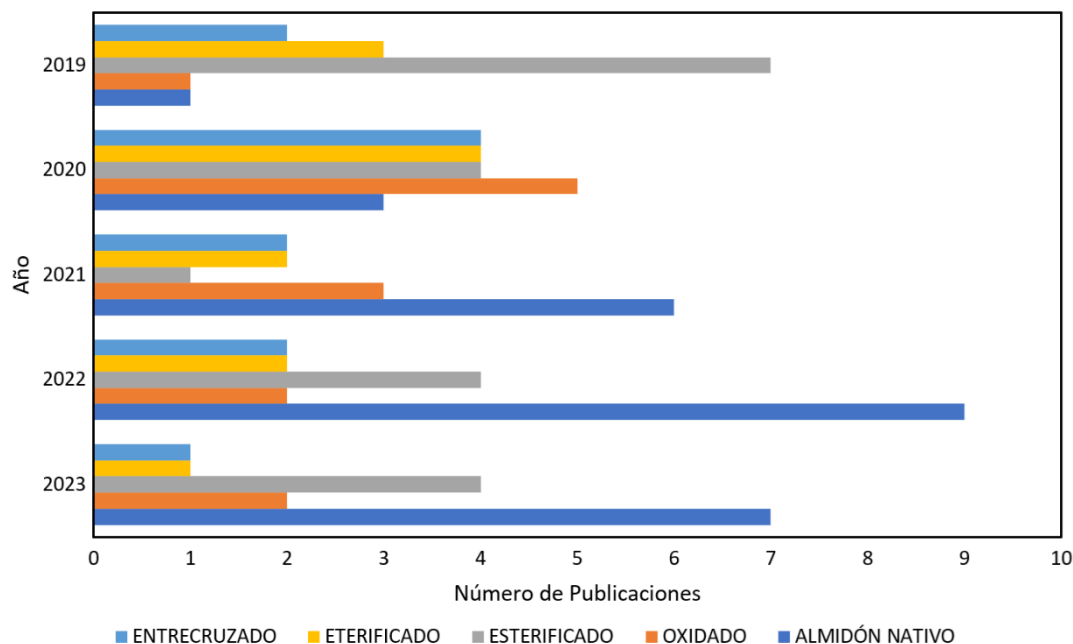


Figura 2. Número de artículos científicos publicados desde 2015 hasta 2023 sobre almidón de semilla de frutos modificado empleando método químico.



Figura 3. Aplicaciones del almidón de semilla de frutos modificado químicamente.

En el entrecruzamiento, a medida que se incrementa el porcentaje de STPP añadido, se observa una disminución correspondiente en el IAA, ISA y pH. Este fenómeno se atribuye a la mayor resistencia de los gránulos de almidón, permitiéndoles soportar mejor condiciones ácidas y elevadas temperaturas, lo que dificulta la descomposición de la viscosidad durante el calentamiento (Xiao et al., 2011). Esta disminución concuerda con los almidones entrecruzados de las semillas de *Castanea sativa* (Oh et al., 2019) y *Persea Americana* (Alves et al., 2013; Cornelia & Christiani,

2018), en contraste con el almidón de *Artocarpus altilis* (Amorim et al., 2021). Esta discrepancia podría atribuirse a la concentración del reactivo utilizado y su impacto en la estructura del almidón durante el proceso de entrecruzamiento.

En consecuencia, esta técnica desempeña un papel significativo en la mejora de las propiedades morfológicas y funcionales de los almidones de semillas de frutos entrecruzados, generando geles más resistentes y ampliando su aplicación específica en diversos productos industrializados.

2.4.2. Aplicaciones viables en la industria alimentaria y no alimentaria

El almidón entrecruzado al presentar una disminución en el PH e ISA, ocasiona que mejoren sus propiedades hidrofóbicas, resistencia del almidón a altas temperaturas y estabilidad de la viscosidad (Santoso et al., 2017). Por lo cual, les hace aptos para su uso en aliños para ensaladas, sopas, cremas, panificación y en la elaboración de biofilms. Como posibles aditivos encajarían en estas aplicaciones los almidones entrecruzados de semilla de *Castanea sativa* (Oh et al., 2019) y *Persea americana* (Alves et al., 2013; Cornelia & Christianti, 2018). Además, Cornelia & Christianti (2018), usaron almidón entrecruzado de semilla de *Persea Americana* en la elaboración de una sopa de crema, generando viscosidad más estable durante el almacenamiento.

3. Desafíos actuales y futuros

El almidón extraído de semilla de frutos ha sido objeto de numerosas investigaciones en los últimos años, abarcando aspectos cruciales como el análisis en sus características morfológicas, fisicoquímicas, funcionales, entre otras. Estos estudios indican que, el almidón nativo extraído de las semillas de fruto, al igual que el almidón procedente de fuentes convencionales, como papa, maíz y yuca, presenta propiedades que pueden ser mejoradas al ser sometidos por métodos de modificación química (Figura 2).

En la actualidad, los almidones químicamente modificados, comúnmente utilizados como aditivos en diversas industrias, tienen su origen mayoritariamente en fuentes convencionales como papa, maíz, yuca, trigo y otras. Sin embargo, en los últimos años, ha surgido un interés creciente en la búsqueda de fuentes innovadoras y aprovechables como alternativas a las tradicionales, con el fin de diversificar su aplicación en distintos sectores industriales (Figura 3).

En el ámbito de la investigación y desarrollo de materiales innovadores, se ha logrado un avance significativo al aislar y modificar el almidón de semilla de frutos. Las modificaciones químicas, que incluyen, oxidación, esterificación, eterificación y entrecruzamiento, han demostrado mantener la morfología del almidón y al mismo tiempo mejoran sus funcionales, como índice de adsorción de agua, solubilidad y poder de hinchamientos. Estos almidones modificados destacan por su capacidad como agentes espesantes, agentes de retención de sabor y presentar un mejor índice de absorción de agua. Por otra parte, el crecimiento en la demanda de biomateriales en diversas industrias, respaldado por la abundancia y bajo costo de las semillas de frutos, representa un avance significativo en la utilización de este tipo de residuos agroindustriales para cubrir la necesidad del desarrollo de materiales avanzados y sostenibles

(Figura 2). Asimismo, es crucial explorar estratégicamente la extracción de almidón a partir de nuevas semillas y/o de partes complementarias de los frutos. Además, se hace necesario continuar el desarrollo de métodos de modificación química, buscando parámetros de reacción óptimos y eficientes que produzcan modificaciones más notorias en el almidón. De igual modo, es fundamental también elegir solventes químicos que sean respetuosos y amigables con el medio ambiente. Este enfoque integral permitiría avanzar hacia una producción de almidón modificado más sostenible y beneficioso para la alimentación y el entorno.

4. Conclusiones

El uso de fuentes no convencionales de almidón, como las semillas de frutos, con la posterior mejora de sus propiedades a través de modificaciones químicas, en lugar de depender exclusivamente de fuentes tradicionales como la papa, maíz, trigo, arroz, yuca, entre otras, emerge como una estrategia altamente beneficiosa para el progreso en la industria alimentaria y la preservación medioambiental. Este enfoque aborda la preocupante problemática de la contaminación ambiental ocasionada por las semillas de frutos, que generan considerables cantidades de residuos en el ámbito agroindustrial. Además, la revisión refleja que los diferentes métodos de modificación química en el almidón de semilla de frutos, como la oxidación, esterificación, eterificación y entrecruzamiento, preservan la estructura morfológica del gránulo del almidón, al mismo tiempo que mejoran las propiedades funcionales tales como el índice de adsorción de agua, la solubilidad y el poder de hinchamiento. Por lo tanto, los almidones derivados de semillas de frutos podrían resultar atractivos para su aplicación en la industria alimentaria y no alimentaria.

Conflicto de intereses

La totalidad de los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Yulissa Ventura-Avalos: Conceptualización, Escritura-revisión y edición, Escritura-borrador original, Visualización. **Rebeca Díaz-Soto:** Escritura-borrador original, Visualización. **José Soriano-Colchado:** Escritura-revisión y edición. **Gabriela Barraza-Jáuregui:** Supervisión, Escritura-revisión y edición, Visualización.

ORCID

Y. Ventura-Avalos  <https://orcid.org/0009-0009-7239-433X>

R. Díaz-Soto  <https://orcid.org/0009-0005-4126-4090>

J. Soriano-Colchado  <https://orcid.org/0000-0001-9000-0570>

G. Barraza-Jáuregui  <https://orcid.org/0000-0002-0376-2751>

References

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>

- Agama-Acevedo, E., Bello-Pérez, L. A., Pacheco-Vargas, G., Nuñez-Santiago, M. C., Evangelista-Lozano, S., & Gutiérrez, T. J. (2022). Starches isolated from the pulp and seeds of unripe pouteria campechiana fruits as potential health-promoting food additives. *Starch*, 75(1-2), 2200089. <https://doi.org/10.1002/star.202200089>
- Agwamba, E. C., Hassan, L. G., & Achor, M. (2016). Physicochemical Analysis of Carboxymethyl Mango (*Mangifera Indica*) Starch. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 9, 69-74. <https://doi.org/10.9790/5736-0912016974>
- Agwamba, E. C., Maxwell, T. K., & Nwasuka, S. (2018). Effect of Carboxymethylation on Porosity and Flow Property of Mango Starch. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 9(6).
- Alemu, N., Balakrishnan, S., & Debtera, B. (2022). Extraction and Characterisation of Avocado Seed Starch, and Its Blend with Enset Cellulosic. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, e9908295. <https://doi.org/10.1155/2022/9908295>
- Alvarez-Yanamango, E., Chumpitaz, G., & Fredy, H. (2020). *Recuperación y caracterización del almidón de semilla de Lúcumá (Pouteria lucuma) con potencial aplicación industrial*. <http://laccei.org/LACCEI2020-VirtualEdition/meta/FP587.html>
- Alves, I. R., Albuquerque, F. S. M. de, Aquino, J. de S., & Queiroga Neto, V. (2013). The effect of chemical modification by cross-linking reaction on the properties of starch made of *Persea americana* Mill avocado seeds. *Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos*, 31(2), 295-308.
- Alves, I. R., Magnani, M., Albuquerque, F. S. M. de, Batista, K. S., Aquino, J. de S., & Queiroga-Neto, V. (2017). Characterization of the chemical and structural properties of native and acetylated starches from avocado (*Persea americana* Mill.) seeds. *International Journal of Food Properties*, 20(sup1), S279-S289. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295259>
- Amorim, T. S., Andrade, I. H. P., Ottoni, C. G., Camilloto, G. P., & Cruz, R. S. (2021). Tailoring Breadfruit (*Artocarpus altilis*) Starch: Cross-Linking Starch from This Non-Conventional Source towards Improved Technologically Relevant Properties and Enabled Food Applications. *Starch* 73(11-12), 2100058. <https://doi.org/10.1002/star.202100058>
- Aparicio-Saguilán, A., Vázquez-León, L. A., Martínez-Cigarroa, A. S., Carpintero-Tepole, V., Fernández Barbero, G., Acosta-Osorio, A. A., & Páramo-Calderón, D. E. (2024). Characterization of Starch from *Jinicuil (Inga jinicuil)* Seeds and Its Evaluation as Wall Material in Spray Drying. *Agronomy*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020272>
- Apriani, M., Cahyono, L., Utomo, A. P., Nugraha, A. T., & Alfira, D. C. N. (2022). Preliminary investigation of bioplastics from durian seed starch recovery using PEG 400 for reducing marine debris. *Journal of Ecological Engineering*, 23(2). <https://doi.org/10.12911/22998993/144824>
- Aqil, M., Moussema Nzenguet, A., Essamlali, Y., Snik, A., Larzek, M., & Zahouily, M. (2017). Graphene Oxide Filled Lignin/Starch Polymer Bionanocomposite: Structural, Physical, and Mechanical Studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(48), 10571-10581. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04155>
- Ashogbon, A. O. (2021). Dual modification of various starches: Synthesis, properties and applications. *Food Chemistry*, 342, 128325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128325>
- Babić, J., Šubarić, D., Ackar, D., Kovačević, D., Piližota, V., & Kopjar, M. (2007). Preparation and characterization of acetylated tapioca starches. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 103(12), 580-585.
- Bai, Y., & Shi, Y.-C. (2011). Structure and preparation of octenyl succinic esters of granular starch, microporous starch and soluble maltodextrin. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.012>
- Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Zamudio-Flores, P. B., Mendez-Montealvo, G., & Rodríguez-Ambríz, S. L. (2010). Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch. *LWT - Food Science and Technology*, 43(9), 1434-1440. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.04.003>
- Bertoft, E. (2017). Understanding Starch Structure: Recent Progress. *Agronomy*, 7(3), 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030056>
- Chandrasekar, C. M., Nespoli, L., Bellesia, T., Ghaani, M., Farris, S., & Romano, D. (2024). Fabrication of double layer nanoparticle infused starch-based thermoplastic food packaging system for meat preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127689. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127689>
- Chen, Q., Yu, H., Wang, L., Abdin, Z., Chen, Y., et al. (2015). Recent progress in chemical modification of starch and its applications. *RSC Advances*, 5(83), 67459-67474. <https://doi.org/10.1039/C5RA10849G>
- Chen, Y., Su, Y., Bai, R., Li, J., & Zheng, T. (2022). Preparation and characterization of octenyl succinic anhydride-modified ginkgo seed starch with enhanced physicochemical and emulsifying properties. *Journal of Food Science*, 87(10), 4453-4464. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16321>
- Chong, W. T., Uthumporn, U., Karim, A. A., & Cheng, L. H. (2013). The influence of ultrasound on the degree of oxidation of hypochlorite-oxidized corn starch. *LWT*, 50(2), 439-443. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.024>
- Chowdhury, M., Hossain, N., Noman, T. I., Hasan, A., Shafiq, A., & Mohammad Abul, K. (2022). Biodegradable, physical and microbial analysis of tamarind seed starch infused eco-friendly bioplastics by different percentage of Arjuna powder. *Results in Engineering*, 13, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100387>
- Chung, H.-J., Woo, K.-S., & Lim, S.-T. (2004). Glass transition and enthalpy relaxation of cross-linked corn starches. *Carbohydrate Polymers*, 55(1), 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.04.002>
- Cornelia, M., & Christiani, A. (2018). Utilization of modified starch from avocado (*Persea americana* Mill.) seed in cream soup production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 102, 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/102/1/012074>
- Costa, B. P., Carpiné, D., Ikeda, M., Alves, F. E. B. da S., de Melo, A. M., & Ribani, R. H. (2022). Developing a bioactive and biodegradable film from modified loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl) seed starch. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(24), 14297-14313. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11780-z>
- Costa, B. P., Carpiné, D., Ikeda, M., Pazzini, I. A. E., da Silva Bambilra Alves, F. E., de Melo, A. M., & Ribani, R. H. (2023). Bioactive coatings from non-conventional loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl) seed starch to extend strawberries shelf-life: An antioxidant packaging. *Progress in Organic Coatings*, 175, 107320. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107320>
- Costa-Conto, L., Plata-Oviedo, M. S. V., Joy Steel, C., & Chang, Y. K. (2011). Physico-chemical, morphological, and pasting properties of Pine nut (*Araucaria angustifolia*) starch oxidized with different levels of sodium hypochlorite. *Starch*, 63(4), 198-208. <https://doi.org/10.1002/star.201000133>
- Das, S., & Das, M. K. (2019). Synthesis and characterization of thiolated jackfruit seed starch as a colonic drug delivery carrier. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 53-62. <https://doi.org/10.22159/ijap.2019v11i3.31895>
- Einstein, A., Teodosio, M. de M., Hérica, R., Araújo, C. E. R., Onias, E. A., Oliveira, A., & Santos, E. da N. (2020). Application of tamarind seed starch as edible coating in the post-harvest quality of grapes 'isabel' (*Vitis labrusca* × *Vitis vinifera* L.). <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.06.p2250>
- Elomaa, M., Asplund, T., Soininen, P., Laatikainen, R., Peltonen, S., Hyvärinen, S., & Urtti, A. (2004). Determination of the degree of substitution of acetylated starch by hydrolysis, ¹H NMR and TGA/IR. *Carbohydrate Polymers*, 57(3), 261-267. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.05.003>
- Esua, O. J., Okonkwo, C. E., Ajani, C. K., Basse, E. J., Ali, M., Hussain, N., Basse, A. P., Adeyanju, A. A., Chin, N. L., Zeng, X.-A., & Liu, H. (2024). Chapter 2—Litchi seed starch-isolation, modification, and characterization. En J. M. Lorenzo & S. P. Bangar (Eds.), *Non-Conventional Starch Sources* (pp. 21-59). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18981-4.00002-1>

- Fan, Y., & Picchioni, F. (2020). Modification of starch: A review on the application of "green" solvents and controlled functionalization. *Carbohydrate Polymers*, 241, 116350. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116350>
- Fasuan, T. O., & Akanbi, C. T. (2018). Oxidation of *Amaranthus viridis* starch: Amylose content evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(11), e13813. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13813>
- Ferraz, C. A., Fontes, R. L. S., Fontes-Sant'Ana, G. C., Calado, V., López, E. O., & Rocha-Leão, M. H. M. (2019). Extraction, modification, and chemical, thermal and morphological characterization of starch from the agro-industrial residue of mango (*Mangifera indica* L.) var. Ubá. *Starch*, 71, 1800023. <https://doi.org/10.1002/star.201800023>
- Fonseca, L. M., Gonçalves, J. R., El Halal, S. L. M., Pinto, V. Z., Dias, A. R. G., Jacques, A. C., & Zavareze, E. da R. (2015). Oxidation of potato starch with different sodium hypochlorite concentrations and its effect on biodegradable films. *LWT*, 60(2, Part 1), 714-720. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.052>
- Guo, K., Lin, L., Fan, X., Zhang, L., & Wei, C. (2018). Comparison of structural and functional properties of starches from five fruit kernels. *Food Chemistry*, 257, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.004>
- Halal, S. L. M. E., Colussi, R., Pinto, V. Z., Bartz, J., Radunz, M., Carreño, N. L. V., Dias, A. R. G., & Zavareze, E. da R. (2015). Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches. *Food Chemistry*, 168, 247-256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.046>
- Han, F., Liu, M., Gong, H., Lü, S., Ni, B., & Zhang, B. (2012). Synthesis, characterization and functional properties of low substituted acetylated corn starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 50(2), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2012.02.030>
- Handayani, P. A., Devi, A. L., & Ganisha, N. A. (2023). Optimization of the Elongation of Bioplastic from Durian Seed Starch Using Response Surface Methodology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1203(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1203/1/012002>
- Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., Mehmood, S., Bilal-Ul-Amin, Ullah, R. S., Khan, A., & Nazir, A. (2019). Advances in chemical modifications of starches and their applications. *Carbohydrate Research*, 476, 12-35. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007>
- Hassan, L. G., Agwamba, E., Achor, M., Izuagie, T., Tsafe, A. I., R. U. Wasagu, K. J. U., & Sani, N. A. (2015). Investigation into Native Mango Starch Carboxymethylation. *International Journal of Science for Global Sustainability*, 1(1), Article 1.
- Heinze, T., Liebert, T., Heinze, U., & Schwikal, K. (2004). Starch derivatives of high degree of functionalization 9: Carboxymethyl starches. *Cellulose*, 11(2), 239-245. <https://doi.org/10.1023/B:CELL.0000025386.68486.a4>
- Hornung, P. S., Rosa da Silveira Lazzarotto, S., Belletini, M. B., Lazzarotto, M., Beta, T., Ribani, R. H., & Schnitzler, E. (2018). Novel Oxidized and UV-Irradiated *Araucaria angustifolia* Pine Seed Starch for Enhanced Functional Properties. *Starch*, 71(3-4), 1800140. <https://doi.org/10.1002/star.201800140>
- Ibikunle, A. A., Sanyaolu, N. O., Yussuf, S. T., Ogunneye, A. L., Badejo, O. A., & Olaniji, O. M. (2019). Effects of chemical modification on functional and physical properties of African star apple kernel (*Chrysophyllum albidum*) starch. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 13(1), 1-11. <https://doi.org/10.5897/AJPAC2018.0764>
- Jiménez-Hernández, J., Meneses-Esparza, F., Rosendo-Escobar, J., Viver-Vera, M. A., Bello-Pérez, L. A., & García-Suárez, F. J. (2011). Extracción y caracterización del almidón de las semillas de *Enterolobium cyclocarpum* Extraction and characterization of starch from *Enterolobium cyclocarpum* seeds. *Cyta - Journal of Food*, 9(2), 89-95. <https://doi.org/10.1080/19476331003743626>
- Kaur, J., Borah, A., Chutia, H., & Gupta, P. (2023). Extraction, modification, and characterization of native litchi seed (*Litchi chinesis* Sonn.) starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12913>
- Kaur, L., Singh, N., & Singh, J. (2004). Factors influencing the properties of hydroxypropylated potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 55(2), 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.09.011>
- Kaur, M., & Bhullar, G. K. (2016). Partial Characterization of Tamarind (*Tamarindus indica* L.) Kernel Starch Oxidized at Different Levels of Sodium Hypochlorite. *International Journal of Food Properties*, 19(3), 605-617. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1038722>
- Kaur, R., Bobade, H., Sachdev, P. A., & Kaur, S. (2024). Chapter 3 - Jackfruit kernel starch-composition, structure, properties and modifications. En J. M. Lorenzo & S. P. Bangar (Eds.), *Non-Conventional Starch Sources* (pp. 61-101). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18981-4.00003-3>
- Khanoonkon, N., Yoksan, R., & Ogale, A. A. (2016). Morphological characteristics of stearic acid-grafted starch-compatible linear low density polyethylene/thermoplastic starch blown film. *European Polymer Journal*, 76, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.02.001>
- Kittipongpatana, N., Wiriyacharee, P., Phongphisutthinant, R., Chaipoot, S., Somjai, C., & Kittipongpatana, O. S. (2021). Resistant Starch Contents of Starch Isolated from Black Longan Seeds. *Molecules*, 26(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/molecules26113405>
- Kong, X., Yang, W., Zuo, Y., Dawood, M., & He, Z. (2023). Characteristics of physicochemical properties, structure and in vitro digestibility of seed starches from five loquat cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126675. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2023.126675>
- Kulkarni, S. D., Sinha, B. N., & Jayaram Kumar, K. (2013). Synthesis, characterization and evaluation of release retardant modified starches of *Lagenaria siceraria* seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 61, 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2013.07.027>
- Kumar, K. J., Varma, Ch. A. K., & Panpalia, S. G. (2014). Physicochemical and release characteristics of acetylated Indian palmyrah retrograded shoot starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 69, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2014.05.023>
- Lacerda, L. G., Colman, T. A. D., Bauab, T., da Silva Carvalho Filho, M. A., Demiate, I. M., de Vasconcelos, E. C., & Schnitzler, E. (2014). Thermal, structural and rheological properties of starch from avocado seeds (*Persea americana*, Miller) modified with standard sodium hypochlorite solutions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115(2), 1893-1899. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3349-z>
- Lawal, O. S., Ogundiran, O. O., Awokoya, K., & Ogunkunle, A. O. (2008). The low-substituted propylene oxide etherified plantain (*Musa paradisiaca normalis*) starch: Characterization and functional parameters. *Carbohydrate Polymers*, 74(3), 717-724. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.04.039>
- Lewandowicz, J., Le Thanh-Blicharz, J., & Szwengiel, A. (2022). The Effect of Chemical Modification on the Rheological Properties and Structure of Food Grade Modified Starches. *Processes*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/pr10050938>
- Lin, D., Zhou, W., Yang, Z., Zhong, Y., Xing, B., et al. (2019). Study on physicochemical properties, digestive properties and application of acetylated starch in noodles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 128, 948-956. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2019.01.176>
- Lin, D., Zhou, W., Zhao, J., Lan, W., Chen, R., et al. (2017). Study on the synthesis and physicochemical properties of starch acetate with low substitution under microwave assistance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 103, 316-326. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2017.05.056>
- Liu, J., Wang, B., Lin, L., Zhang, J., Liu, W., Xie, J., & Ding, Y. (2014). Functional, physicochemical properties and structure of cross-linked oxidized maize starch. *Food Hydrocolloids, Complete*, 36, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.013>
- Luo, W., Li, B., Zhang, Y., Tan, L., Hu, C., Huang, C., Chen, Z., & Huang, L. (2023). Unveiling the retrogradation mechanism of a novel high amylose content starch-*Pouteria campechiana* seed. *Food Chemistry*, X, 18, 100637. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.100637>

- Magallanes-Cruz, P. A., Duque-Buitrago, L. F., & del Rocio Martínez-Ruiz, N. (2023). Native and modified starches from underutilized seeds: Characteristics, functional properties and potential applications. *Food Research International*, 169, 112875. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112875>
- Manzoor, A., & Ahmad, S. (2024). Chapter 4 - Longan seed starch: Structure, functionality and applications. En J. M. Lorenzo & S. P. Bangar (Eds.), *Non-Conventional Starch Sources* (pp. 103-121). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18981-4.00004-5>
- Martins, S. H. F., Pontes, K. V., Fialho, R. L., & Fakhouri, F. M. (2022). Extraction and characterization of the starch present in the avocado seed (*Persea americana* mill) for future applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100303. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100303>
- Masina, N., Choonara, Y. E., Kumar, P., du Toit, L. C., Govender, M., Indermun, S., & Pillay, V. (2017). A review of the chemical modification techniques of starch. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1226-1236. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.094>
- Mendes, M. L. M., Bora, P. S., & Ribeiro, A. P. L. (2012). Propriedades morfológicas e funcionais e outras características da pasta do amido nativo e oxidado da amêndoa do caroço de manga (*Mangifera indica* L), variedade Tommy Atkins. *Rev. Inst. Adolfo Lutz*, 76-84.
- Mollega, S., Barrios, S. E., Feijoo, J. L., Contreras, J. M., Müller, A. J., & López-Carrasquero, F. (2011). Modificación química de almidón de yuca nativo mediante la reacción de carboximetilación en medio acuoso. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 26(1), 117-128.
- Muljana, H., Picchioni, F., Heeres, H. J., & Janssen, L. P. B. M. (2010). Green starch conversions: Studies on starch acetylation in densified CO₂. *Carbohydrate Polymers*, 82(3), 653-662. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.032>
- Musa, S. H., & Sagagi, B. S. (2023). Extraction and some characteristics of mango seed kernel starch for industrial applications / Saidu Hassan Musa and Balarabe Sarki Sagagi. *Science Letters (Scl)*, 17(2), Article 2.
- Naknaen, P. (2014). Physicochemical, Thermal, Pasting and Microstructure Properties of Hydroxypropylated Jackfruit Seed Starch Prepared by Etherification with Propylene Oxide. *Food Biophysics*, 9(3), 249-259. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9347-2>
- Naknaen, P., Tobkaew, W., & Chaichaleom, S. (2017). *Properties of jackfruit seed starch oxidized with different levels of sodium hypochlorite*. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1191868>
- Navarrete-Tumbaco, C. J., Mezones-Santana, J. A., Ponce, W., Brito, B., Viera, W., Mosquera, A. C., & Riera, M. A. (2023). Obtención y caracterización de bioplásticos a partir de almidón acetilado de semillas de aguacate. *Avances en Química*, 18(1), Article 1.
- Nawaz, H., Waheed, R., Nawaz, M., Shahwar, D., Nawaz, H., Waheed, R., Nawaz, M., & Shahwar, D. (2020). Physical and Chemical Modifications in Starch Structure and Reactivity. En *Chemical Properties of Starch*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88870>
- Nayak, P., Rayaguru, K., Brahma, S., Routray, W., & Dash, S. K. (2021). Standardization of process protocol for isolation of starch from mango kernel and its characterization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(7), 2813-2825. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11622>
- Nguyen, T. K., That, N. T. T., Nguyen, N. T., & Nguyen, H. T. (2022). Development of Starch-Based Bioplastic from Jackfruit Seed. *Advances in Polymer Technology*, 2022, e6547461. <https://doi.org/10.1155/2022/6547461>
- Oderinde, A. A., Ibikunle, A. A., Bakre, L. G., & Babarinde, N. A. A. (2023). Effects of Acetylation, Acid-thinning and Oxidation on *Chrysophyllum albidum* (African Star Apple) Kernel Native Starch. *Chemical Papers*. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02870-9>
- Oh, S.-M., Kim, H., Bae, J.-E., Ye, S.-J., Kim, B.-Y., Choi, H. D., Choi, H.-W., & Baik, M.-Y. (2019). Physicochemical and retrogradation properties of modified chestnut starches. *Food Science and Biotechnology*, 28(6), 1723-1731. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00622-8>
- Okekunle, M. O., Adebowale, K. O., Olu-Owolabi, B. I., & Lamprecht, A. (2020). Physicochemical, morphological and thermal properties of oxidized starches from Lima bean (*Phaseolus lunatus*). *Scientific African*, 8, e00432. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00432>
- Olawoye, B., Jolayemi, O. S., Akinyemi, T. Y., Nwaogwu, M., Oluwajuyitan, T. D., Popoola-Akinola, O. O., Fagbohun, O. F., & Akanbi, C. T. (2023). Modification of Starch. En V. S. Sharanagat, D. C. Saxena, K. Kumar, & Y. Kumar (Eds.), *Starch: Advances in Modifications, Technologies and Applications* (pp. 11-54). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35843-2_2
- Oluwajuyitan, T. D. (2024). Chapter 1 - Avocado seed starch: Structure, functionality, and applications. En J. M. Lorenzo & S. P. Bangar (Eds.), *Non-Conventional Starch Sources* (pp. 3-19). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18981-4.00001-X>
- Pech-Cohuo, S. C., Hernandez-Colula, J., Gonzalez-Canche, N. G., Salgado-Transito, I., Uribe-Calderon, J., Cervantes-Uc, J. M., Cuevas-Bernardino, J. C., Ayora-Talavera, T., & Pacheco, N. (2021). Starch from Ramon seed (*Brosimum alicastrum*) obtained by two extraction methods. *MRS Advances*, 6(38), 875-880. <https://doi.org/10.1557/s43580-021-00134-w>
- Pérez-Pacheco, E., Estrada-León, R. J., Duch, E. S., Bello-Pérez, L. A., Betancur-Ancona, D., & Moo-Huchin, V. M. (2017). Partial characterization of starch obtained from Ramon (*Brosimum alicastrum* Swartz), oxidized under different conditions. *Starch - Stärke*, 69(5-6), 1600233. <https://doi.org/10.1002/star.201600233>
- Pu, H., Chen, L., Li, X., Xie, F., Yu, L., & Li, L. (2011). An Oral Colon-Targeting Controlled Release System Based on Resistant Starch Acetate: Synthesis, Characterization, and Preparation of Film-Coating Pellets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10), 5738-5745. <https://doi.org/10.1021/jf12005468>
- Rahman, S., S. S., B. T. A., & Mahendradatta, M. (2017). The Chemical Contents of the Starch of Palado Seed (*Aglaia* sp) with Pregelatinization, Cross-linking, and Acetylation Modifications. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 32(3), Article 3.
- Ramírez-Brewer, D., Méndez, D. A., García-Zapateiro, L. A., López-Rubio, A., & Fabra, M. J. (2024). Rheological properties, microstructure and stability of oil-in-water emulsions prepared with mango kernel starch (var. Sugar and Tommy). *LWT*, 194, 115802. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115802>
- Rincón, A. M., Lizet Bou Rached, L. E., & Aragoza, F. P. (2007). Efecto de la acetilación y oxidación sobre algunas propiedades del almidón de semillas de Fruto de pan (*Artocarpus altifolius*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(3), 287-294.
- Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungtsardthong, V., & Uttapap, D. (2005). Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. *Carbohydrate Polymers*, 61(2), 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.05.024>
- Saleh, N. A., Nordin, R., Ahmad, A. A., & Fiazil, F. F. (2023). Physicochemical characterization of starch from mango seed kernel extracted using different methods. *AIP Conference Proceedings*, 2703(1), 080006. <https://doi.org/10.1063/5.0117134>
- Sangseethong, K., Ketsilp, S., & Sriroth, K. (2005). The Role of Reaction Parameters on the Preparation and Properties of Carboxymethyl Cassava Starch. *Starch*, 57(2), 84-93. <https://doi.org/10.1002/star.200400302>
- Santos, G. P., Miranda, B. M., Di-Medeiros, M. C. B., Almeida, V. O., Ferreira, R. D., Morais, D. A. B. de, Queiroz, D. L. A., Leles, M. I. G., Lião, L. M., & Fernandes, K. F. (2024). The potential exploitation of the Malay-red apple (*Syzygium malaccense*) seed as source of a phosphorylated starch. *Carbohydrate Research*, 535, 109008. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2023.109008>
- Santoso, B., Pratama, F., Hamzah, B., & Pambayun, R. (2017). Karakteristik Fisik dan Kimia *AgriGanyong* dan Gadung Termodifikasi Metode Ikatan Silang. *agriTECH*, 35(3), Article 3. <https://doi.org/10.22146/agritech.9337>
- Sharma, M., Bains, A., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., Ali, N., Attia, S. M., Patil, S., Chawla, P., & Sharma, M. (2024). Exploring the Structural,

- Thermal, and Protective Potential of Loquat Seed Starch and Flax Seed Oil Nanoemulsion Coating on Strawberry. *Starch*, 2300166. <https://doi.org/10.1002/star.202300166>
- Shubeena, A., Wani, I. A., Gani, A., Sharma, P., Wani, T. A., Masoodi, F. A., Hamdani, A., & Muzafar, S. (2015). Effect of acetylation on the physico-chemical properties of Indian Horse Chestnut (*Aesculus indica* L.) starch. *Starch*, 67(3-4), 311-318. <https://doi.org/10.1002/star.201400156>
- Silva, E. K., Anthero, A. G. da S., Emerick, L. B., Zabot, G. L., Hubinger, M. D., & Meireles, M. A. A. (2022). Low-frequency ultrasound-assisted esterification of *Bixa orellana* L. seed starch with octenyl succinic anhydride. *International Journal of Biological Macromolecules*, 207, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.090>
- Simsek, S., Ovando-Martínez, M., Whitney, K., & Bello-Pérez, L. A. (2012). Effect of acetylation, oxidation and annealing on physicochemical properties of bean starch. *Food Chemistry*, 134(4), 1796-1803. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.078>
- Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>
- Souza, J. C. A. de, Macena, J. F. F., Andrade, I. H. P., Camilloto, G. P., & Cruz, R. S. (2021). Functional characterization of mango seed starch (*Mangifera indica* L.). *Research, Society and Development*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.10118>
- Spier, F., Zavareze, E. da R., Marques e Silva, R., Elias, M. C., & Dias, A. R. G. (2013). Effect of alkali and oxidative treatments on the physicochemical, pasting, thermal and morphological properties of corn starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(9), 2331-2337. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6049>
- Thory, R., & Sandhu, K. S. (2017). A Comparison of mango kernel starch with a novel starch from litchi (*Litchi chinensis*) kernel: Physicochemical, morphological, pasting, and rheological properties. *International Journal of Food Properties*, 20(4), 911-921. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1188403>
- Tung, N. T., Thuy, L. T. H., Luong, N. T., Van Khoi, N., Ha, P. T. T., & Thang, N. H. (2021). The molecular structural transformation of jackfruit seed starch in hydrogen peroxide oxidation condition. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(11), 100192. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100192>
- Van, C. K., Nguyen, P. N. T., Tran, T. Y. N., Mai, H. C., Tran, T. L., & Nguyen, T. Q. (2021). Carboxymethyl Jackfruit Seed Starch: Synthesis, characterization, and influence of reaction parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1092(1), 012081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1092/1/012081>
- Vanier, N. L., El Halal, S. L. M., Dias, A. R. G., & da Rosa Zavareze, E. (2017). Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. *Food Chemistry*, 221, 1546-1559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.138>
- Vellaisamy, A. J., Guruchandran, S., Bakshi, A., Muninathan, C., & Ganesan, N. D. (2021). Study on enhanced mechanical, barrier and optical properties of chemically modified mango kernel starch films. *Packaging Technology and Science*, 34(8), 485-495. <https://doi.org/10.1002/pts.2574>
- Wang, M., Wu, Y., Liu, Y., & Ouyang, J. (2020). Effect of Ultrasonic and Microwave Dual-Treatment on the Physicochemical Properties of Chestnut Starch. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym12081718>
- Wang, X., Huang, L., Zhang, C., Deng, Y., Xie, P., Liu, L., & Cheng, J. (2020). Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 240, 116292. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292>
- Wiberg, K. B., & Rablen, P. R. (1993). Substituent effects. 5. Vinyl and ethynyl derivatives. An examination of the interaction of amino and hydroxy groups with carbon-carbon double and triple bonds. *Journal of the American Chemical Society*, 115(20), 9234-9242. <https://doi.org/10.1021/ja00073a044>
- Wong, K. T., Poh, G. Y. Y., Goh, K. K. T., Wee, M. S. M., & Jeyakumar Henry, C. (2021). Comparison of physicochemical properties of jackfruit seed starch with potato and rice starches. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 364-379. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1885439>
- Xiao, H., Lin, Q., Liu, G.-Q., Wu, Y., Tian, W., Wu, W., & Fu, X. (2011). Physicochemical properties of chemically modified starches from different botanical origin. *Scientific Research and Essays*, 6(21), 4517-4525. <https://doi.org/10.5897/SRE11.618>
- Xie, F., Zhang, H., Xiong, Z., Wu, Y., & Ai, L. (2022). Effects and mechanism of sucrose on retrogradation, freeze-thaw stability, and texture of corn starch-tamarind seed polysaccharide complexes. *Journal of Food Science*, 87(2), 623-635. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16006>
- Yaowiwat, N., Poomanee, W., Leelapornpisid, P., & Sriphanakul, W. (2024). Potential use of Thai mango (*Mangifera indica* Linn. Cultivar Chok-Anan) seed porous starch for retention of aroma compounds from coffee extract. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265, 131033. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131033>
- Yepes, D. M. (2015). Acetilación enzimática de almidones: Una opción de valor agregado. *Tumbaga*, 1(10), 6.
- Yu-Fang, C., Kaur, L., & Singh, J. (2018). Chapter 7—Chemical Modification of Starch. En M. Sjöö & L. Nilsson (Eds.), *Starch in Food (Second Edition)* (pp. 283-321). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00007-X>
- Yusoff, M. S., Aziz, H. A., Zamri, M. F. M. A., Suja', F., Abdullah, A. Z., & Basri, N. E. A. (2018). Flocculation behavior and removal mechanisms of cross-linked Durio zibethinus seed starch as a natural flocculant for landfill leachate coagulation-flocculation treatment. *Waste Management*, 74, 362-372. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.016>
- Zhang, X., Zhao, L., Zhou, W., Liu, X., Hu, Z., & Wang, K. (2022). Variations in the Multilevel Structure, Gelatinization and Digestibility of Litchi Seed Starches from Different Varieties. *Foods*, 11(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/foods11182821>
- Zhang, Y., Li, G., Wu, Y., Yang, Z., & Ouyang, J. (2019). Influence of amylose on the pasting and gel texture properties of chestnut starch during thermal processing. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.070>
- Zhang, Y., Zhu, K., He, S., Tan, L., & Kong, X. (2016). Characterizations of high purity starches isolated from five different jackfruit cultivars. *Food Hydrocolloids*, 52, 785-794. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.07.037>
- Zhang, Y., Zuo, H., Xu, F., Zhu, K., Tan, L., Dong, W., & Wu, G. (2021). The digestion mechanism of jackfruit seed starch using improved extrusion cooking technology. *Food Hydrocolloids*, 110, 106154. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106154>
- Zheng, Y., Hu, L., Ding, N., Liu, P., Yao, C., & Zhang, H. (2017). Physicochemical and structural characteristics of the octenyl succinic ester of ginkgo starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 94, 566-570. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.017>
- Zhou, F., Liu, Q., Zhang, H., Chen, Q., & Kong, B. (2016). Potato starch oxidation induced by sodium hypochlorite and its effect on functional properties and digestibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.12.050>
- Zhou, X., Yang, J., & Qu, G. (2007). Study on synthesis and properties of modified starch binder for foundry. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2), 407-411. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.001>
- Zięba, T., Szumny, A., & Kapelko, M. (2011). Properties of retrograded and acetylated starch preparations: Part 1. Structure, susceptibility to amylase, and pasting characteristics. *LWT*, 44(5), 1314-1320. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.018>