



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Licenciatura en Ingeniería en Alimentos

Proyecto de Tesis

Modificación de almidón de *Dioscorea alata* con
anhídrido octenil succínico (OSA).

PRESENTA

Sayra Jaquelín Hernández Bautista

Director: Dr. Martín A. Meza Nieto

Co Director: Dr. Rubén Jiménez Alvarado



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Agropecuarias
Institute of Agricultural Sciences
Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos
Academic Area of Agroindustrial Engineering and Food Engineering

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hgo., a 30 de enero de 2026
Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, **Sayra Jaquelin Hernández Bautista**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado "**Modificación de almidón de *Dioscorea alata* con anhídrido octenil succínico (OSA)**", que después de revisarlo en reunión de comité de tesis, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del comité de tesis:

DIRECTOR	Dr. Martín Amador Meza Nieto
CODIRECTOR	Dr. Rubén Jiménez Alvarado
ASESOR	Dr. Juan Pablo Hernández Uribe
ASESOR	Dr. Sergio Soto Simental

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dra. Beatriz del Carmen Coutiño Laguna
Coordinador nombre del P.E.



Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo,
Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo,
México. C.P. 43775
Teléfono: 7717172000 Ext. 42021
ricardo_navarro@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza, la paciencia y la claridad necesarias para llegar hasta este momento. Su guía ha sido mi sostén en cada etapa de este camino.

A mi familia, por su amor incondicional, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por acompañarme con palabras de aliento, comprensión y apoyo constante. Este logro también les pertenece.

A mi Director de tesis, el Dr. Martín A. Meza Nieto y Co Director el Dr. Rubén Jiménez Alvarado, así mismo a mis asesores de tesis el Dr. Juan Pablo Hernández Uribe y el Dr. Sergio Soto Simentel por su dedicación, exigencia académica y orientación permanente. Gracias por compartir su experiencia, por cada observación que fortaleció este trabajo y por impulsarme a alcanzar un nivel más alto de rigor y compromiso.

A mis profesores y compañeros, quienes enriquecieron mi formación con sus enseñanzas, discusiones y colaboración. Gracias por los aprendizajes compartidos y por el compañerismo que hizo más llevadero este proceso.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Instituto de Ciencias Agropecuarias, por sus instalaciones y laboratorios que brindaron los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación. Su apoyo técnico y logístico fue fundamental para concretar cada etapa del proyecto. Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a este logro. Cada gesto, consejo y palabra de ánimo dejó una huella en este proceso que hoy culmina.

Índice

.....	1
RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. HIPÓTESIS.....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	10
4. OBJETIVOS	11
4.1 Objetivo general	11
4.2 Objetivos específicos.....	11
5. REVISIÓN DE LITERATURA	12
5.1 Características del género <i>Dioscorea</i>	12
5.2 <i>Dioscorea alata</i>	13
5.2.1 Origen y producción	13
5.2.2 Morfología de <i>Dioscorea alata</i>	13
5.2.3 Usos de <i>Dioscorea alata</i>	17
5.2.4 Composición química del tubérculo de <i>Dioscorea alata</i>	19
5.3 El almidón.....	22
5.3.1 Composición química	22
5.3.2 Funciones biológicas y tecnológicas	23
5.3.3 Tipos de almidones en la industria alimentaria.....	24
5.3.4 Almidones químicamente modificados	25
5.4 Almidón Modificado con Anhídrido Octenil Succínico	26
5.5 Grado de esterificación (DS)	28
5.6 Capacidad de Retención de Agua (CRA) del almidón	29
5.7 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	30
5.8 Difracción de Rayos X (XRD).....	32
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
6.1 Materia prima.....	34
6.2 Extracción del almidón	34
6.3 Modificación del almidón de <i>Dioscorea alata</i> con Anhídrido Octenil Succínico (OSA)	36
6.4 Determinación del Grado de esterificación del almidón (DS)	37
6.5 Determinación de la Capacidad de Retención de Agua (CRA).....	38

6.6 Método para Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	39
6.7 Método para la Difracción de Rayos X	40
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
7.1 Rendimiento de obtención del almidón de <i>Dioscorea alata</i>	41
7.2 Modificación del almidón de <i>Dioscorea alata</i> con Anhídrido Octenil Succínico	42
7.3 Capacidad de retención de agua (CRA)	44
7.4 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	49
7.5 Difracción de Rayos X (XRD).....	52
8. CONCLUSIONES	55
9. REFERENCIAS	56

Índice de Figuras

Figura 1 a) Enredadera trepadora de <i>D. alata</i> (herbarim, 2020); b) Tallos de <i>D. alata</i> (herbarim, 2020); c) Hojas de <i>D. alata</i> (herbarim, 2020); d) Tubérculo de <i>D. alata</i> (Álvarez, 2024).	16
Figura 2. Estructura química de las fracciones que conforman la molécula de Almidón: (a) Amilosa; (b) Amilopectina.....	23
Figura 3 Reacción del almidón con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) para obtener almidón modificado.....	27
Figura 4 Grado de esterificación de almidón nativo de <i>D. alata</i> con Anhídrido Octenil Succínico a diferentes concentraciones y tiempos de reacción.....	44
Figura 5 Capacidad de Retención de Agua de almidón nativo de <i>D.alata</i> y de los almidones modificados a distintas concentraciones de OSA y distintas temperaturas.....	48
Figura 6 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier de almidón nativo de <i>D.alata</i> y modificado a distintas concentraciones.....	51
Figura 7 Difracción de Rayos X (XRD de almidón nativo de <i>D. alata</i> y modificado a distintas concentraciones	54

Índice de Tablas

Tabla 1 Rendimiento de obtención del almidón de <i>Dioscorea alata</i> expresado en porcentaje.....	41
---	----

RESUMEN

Dioscorea alata es una fuente no convencional de almidón para su aplicación en la industria alimentaria; sin embargo, las propiedades que presenta el almidón nativo de *D. alata* limitan su uso en sistemas que requieren estabilidad y adecuada interacción con el agua. Una estrategia para mejorar dichas propiedades es la modificación química mediante Anhídrido Octenil Succínico (OSA), que permite introducir grupos funcionales en la estructura del almidón. El objetivo del presente trabajo fue modificar químicamente el almidón nativo de *D. alata* mediante esterificación con OSA y evaluar el efecto de diferentes concentraciones y tiempos de reacción sobre el grado de sustitución, la capacidad de retención de agua y la estructura molecular del almidón. Se determinó el grado de sustitución como indicador de la eficiencia del proceso de modificación por medio de un método titulométrico. Asimismo, se evaluó la capacidad de retención de agua a diferentes temperaturas por medio de un método gravimétrico y se analizaron los cambios estructurales mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Difracción de Rayos X (XRD). Los resultados mostraron que el Grado de esterificación dependió principalmente de la concentración de OSA y del tiempo de reacción, observándose valores más elevados a concentraciones de 2.4 % y 3.0 % OSA. La concentración de 3.0 % OSA es la máxima permitida en alimentos y fue a la que se logró el máximo grado de sustitución en todos los tiempos de reacción. Por lo anterior se identificó como tratamiento óptimo el uso de 3.0 % OSA y 2 h de reacción. La capacidad de retención de agua se incrementó de forma notable a temperaturas superiores a 55 °C. Los análisis de FTIR confirmaron la formación de enlaces éster característicos del almidón modificado con OSA, mientras que los patrones de XRD evidenciaron una disminución del grado de cristalinidad conforme aumentó la concentración del agente modificante.

1. INTRODUCCIÓN

Dioscorea alata es una planta trepadora, que presenta como estructura subterránea un tubérculo comestible que contiene una alta cantidad de carbohidratos, nutriente que es la principal fuente de energía del organismo humano. Esta planta se cultiva ampliamente como alimento en zonas tropicales y subtropicales, principalmente de Asia y África, y existen distintas variedades conocidas alrededor del mundo. La propagación de estas plantas se lleva a cabo principalmente por medio de trozos de sus tubérculos, conocidos como semillas-tubérculo. También es posible propagarlas por esquejes de tallo, aunque es menos común. La propagación por semilla es rara, ya que las plantas son dioicas y la floración es irregular. Su lugar de origen no se conoce con certeza, pero se cree que se encuentra en el sudeste asiático. Su área de distribución naturalizada se está expandiendo y potencialmente podría abarcar la mayor parte del sudeste de México (Vázquez et al., 2024).

El almidón es un polisacárido de reserva alimenticia predominante en las plantas, y proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Tanto el almidón como los productos de la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos digeribles de la dieta habitual. De este modo, el almidón es el polisacárido más utilizado en la preparación de productos alimenticios, ya sea como ingrediente o como aditivo alimentario. Los almidones convencionales se obtienen de las semillas de cereales, particularmente de maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum* spp.), varios tipos de arroz (*Oryza sativa*), y de algunas raíces y tubérculos, particularmente de papa (*Solanum tuberosum*), camote (*Ipomoea batatas*) y yuca (*Manihot esculenta*). Sin embargo, existen algunas fuentes no convencionales de almidón tales como el plátano (*Musa paradisiaca*), yuca (*Artocarpus heterophyllus*) y diversas especies de *Dioscorea*. A estos almidones extraídos directamente de la planta sin sufrir modificaciones en su composición química se les conoce como almidones nativos, por lo contrario aquellos a los cuales se les ha sometido a tratamientos químicos, físicos o enzimáticos se les conoce como almidones modificados (Tester et al., 2004).

El almidón nativo presenta limitaciones funcionales, como su insolubilidad en agua, rápida retrogradación, sinéresis, malas propiedades térmicas y baja resistencia al esfuerzo cortante, por lo que se han empleado diversos métodos de modificación, tales como los métodos químicos, enzimáticos, y físicos. Al ser modificado, el almidón ofrece beneficios clave en la industria alimentaria, al mejorar la textura, estabilidad, viscosidad, y resistencia a procesos exigentes como altas temperaturas, congelación y descongelación (Adelawe et al., 2022).

La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo del polímero de almidón. Las reacciones vía éter, formación de ésteres, oxidación y la hidrólisis de los grupos hidroxilos, son algunas modificaciones químicas aplicables al almidón. El Grado de esterificación (DS) está relacionado con la modificación química e indica el promedio del número de sustituciones por unidad de anhidroglucosa en el almidón. El máximo DS es 3 debido a que se presentan tres grupos hidroxilos disponibles por unidad de anhidroglucosa. En general la esterificación de los polisacáridos con ácidos orgánicos y sus derivados es una de las transformaciones más versátiles de estos biopolímeros. La introducción de un grupo éster en el polisacárido constituye un desarrollo importante debido a que permite modificar la naturaleza hidrofílica y obtener cambios significativos en las propiedades mecánicas y térmicas (Contreras et al., 2008). El anhídrido octenil succínico (OSA) se emplea en la esterificación del almidón para producir almidón succinato de octenilo sódico (E1450), un derivado anfifílico ampliamente utilizado en la industria alimentaria. La reacción de esterificación con OSA ocurre en condiciones alcalinas (generalmente pH 8 – 9) y consiste en la sustitución parcial de los grupos hidroxilo del almidón por grupos octenil succinato. Esto introduce cadenas hidrofóbicas (octenilo) junto a porciones hidrofílicas (carboxilato), confiriendo al almidón propiedades emulsionantes y estabilizadoras superiores a las del almidón nativo. El grado de sustitución (DS) típico oscila entre 0.01 y 0.03. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la modificación química con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) sobre las propiedades fisicoquímicas, funcionales y tecnológicas del almidón de *Dioscorea alata*, con el fin de determinar su potencial para la

aplicación industrial como ingrediente funcional y material base para procesos de transformación.

2. HIPÓTESIS

La modificación química del almidón de *Dioscorea alata* mediante la reacción con Anhídrido Octenil Succínico (OSA), bajo diferentes concentraciones y tiempos de reacción, permite controlar su grado de esterificación y generar cambios significativos en sus propiedades funcionales, particularmente en la capacidad de retención de agua.

3. JUSTIFICACIÓN

El almidón proveniente del tubérculo de *Dioscorea alata*, puede ser de gran interés para la industria alimentaria, ya que a través de este se pueden desarrollar aditivos e ingredientes alimentarios con propiedades funcionales y tecnológicas adecuadas (Baah et al., 2009). Este tubérculo, ampliamente disponible en regiones tropicales de Asia y África, representa una fuente alternativa, sostenible y económica de almidón, lo que resulta especialmente relevante ante la demanda creciente de polímeros naturales que puedan sustituir insumos derivados de fuentes convencionales como el maíz o la papa. El almidón nativo de *Dioscorea alata* presenta limitaciones en términos de estabilidad térmica, solubilidad y capacidad de gelificación, factores que restringen su aplicación industrial. Es por ello, que mediante procesos de modificación química, tal como la esterificación con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) es posible mejorar estas propiedades y ampliar su uso en sectores como el alimentario, farmacéutico, cosmético, entre otros (Ribero et al., 2021). Por consiguiente, este estudio resulta pertinente porque promueve el aprovechamiento de un cultivo local, subutilizado, lo que puede contribuir al desarrollo económico de comunidades productoras dándole un valor agregado a este cultivo. La viabilidad del estudio se sustenta en la disponibilidad del tubérculo, en la accesibilidad de las técnicas de modificación y en la importancia creciente de alternativas sustentables para la formulación de nuevos materiales alimenticios.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la modificación química del almidón de *Dioscorea alata* mediante su reacción con Anhídrido Octenil Succínico (OSA), aplicando diferentes concentraciones y tiempos de reacción, con el propósito de determinar cómo estas condiciones influyen en el Grado de esterificación y en las propiedades funcionales del almidón, particularmente en su Capacidad de Retención de Agua, para establecer su potencial de aplicación en la industria alimentaria.

4.2 Objetivos específicos

Caracterizar el almidón nativo de *Dioscorea alata* mediante técnicas de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Difracción de Rayos X (XRD), con el fin de establecer sus propiedades fisicoquímicas iniciales y contar con una base de comparación frente al almidón modificado.

Aplicar la modificación química con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) bajo diferentes concentraciones y tiempos de reacción, para determinar el grado de esterificación alcanzado en cada condición experimental.

Evaluar las propiedades funcionales del almidón modificado, particularmente la Capacidad de Retención de Agua, y analizar la relación entre el Grado de esterificación y los cambios observados, con el propósito de identificar su potencial aplicación en la industria alimentaria

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Características del género *Dioscorea*

La clasificación reciente del Grupo de Filogenia de Angiospermas III (2009), reconoce cuatro géneros en la familia Dioscoreaceae (*Dioscorea*, *Stenomeris*, *Tacca* y *Trichopus*), de los cuales, el género *Dioscorea* es el único distribuido ampliamente, con cientos de especies, aunque no se sabe con precisión el número, se han reportado entre 300 a 800 especies, llegando a los trópicos y subtrópicos de América. Para México se han registrado un poco más de 100 especies, conocidas popularmente como ñame, las cuales están distribuidas principalmente en regiones tropicales y subtropicales; y, en ocasiones se puede encontrar en regiones templadas. En México estas especies se encuentran distribuidas a lo largo del territorio nacional (McVaugh, 1989; Téllez y Schubert, 1987), las cuales no se cultivan, son obtenidas por colecta, ya que su desarrollo generalmente es de forma silvestre (McVaugh, 1989). Son de gran importancia alimentaria, producen tubérculos ricos en carbohidratos, lípidos, vitaminas, minerales y metabolitos secundarios (Soto et al., 2014; Obidiegwu et al., 2020; Velázquez et al., 2022). Se cultivan con un bajo desarrollo tecnológico y se desconocen sus requerimientos agroclimáticos, además, existe poco o nulo conocimiento sobre la forma de cultivar estas especies (Santacruz-Ruvalcaba et al., 2005). Su producción se caracteriza por ser de consumo regional (Hata et al., 2003), el cultivo es artesanal en pequeñas áreas y se emplea la mano de obra familiar (Mendoza-Crespo y Ortiz-Velásquez, 2020; Darkwa et al., 2019).

Las *Dioscorea spp* son plantas trepadoras, dioicas o monoicas, con hojas simples, lobadas o compuestas, alternas, generalmente cordadas. Las flores son pequeñas, agrupadas en racimos, espigas o panículas simples y son unisexuales, también poseen rizomas o tubérculos subterráneos, y sus partes aéreas son principalmente tallos trepadores y follaje (Téllez y Torres, 2021). Los tubérculos de *Dioscorea spp* son colectados y almacenados para su consumo, generalmente se consumen cocidos, asados o fritos. Otro aspecto sobresaliente de este género es su importancia medicinal en el combate de enfermedades como la malaria, el

asma, el dengue, la fiebre amarilla, la diabetes, el reumatismo, afecciones de la piel, tosferina, y catarro bronquial, así como sus propiedades cardiotónicas, calmantes y reguladores de las funciones intestinales (Dey et al., 2016).

5.2 *Dioscorea alata*

5.2.1 Origen y producción

Dioscorea alata es originario de las zonas tropicales y subtropicales de Asia y África, que se ha adaptado a otras partes del mundo con climas tropicales, ya sea como cultivo industrial o como plantas silvestres introducidas por la actividad humana (Rodríguez, 2000). *Dioscorea alata* se ha introducido en regiones tropicales y subtropicales de América, y por lo tanto, ofrece oportunidades para contribuir a la seguridad alimentaria. A pesar de su importancia, la producción y la productividad de *Dioscorea alata* en México es limitada y su producción es a pequeña escala, dispersa (Piedra et al., 2024).

5.2.2 Morfología de *Dioscorea alata*

Dioscorea alata es una especie vegetal perteneciente a la familia Dioscoreaceae, ampliamente reconocida por la importancia alimentaria de sus órganos subterráneos. Se trata de una planta monocotiledónea cuya principal estructura de reserva energética es el tubérculo, el cual constituye la parte comestible y de mayor interés económico y tecnológico. Esta especie es comúnmente conocida como ñame de agua o ñame morado y se cultiva principalmente en regiones tropicales y subtropicales del mundo (Shaajeela et al., 2011).

Desde el punto de vista morfológico, *D. alata* es una enredadera trepadora perenne (Figura 1a), aunque en sistemas agrícolas suele cultivarse como anual. Su hábito de crecimiento es característico, ya que presenta tallos volubles que se

enrollan en el sentido de las manecillas del reloj, rasgo distintivo del género *Dioscorea*. Estos tallos, también conocidos como bejucos, son herbáceos, alargados y pueden alcanzar longitudes superiores a los 10–15 m cuando se desarrollan en condiciones favorables y con estructuras de soporte adecuadas (Matuda, 1953).

Los tallos de *Dioscorea alata* (Figura 1b) presentan una sección transversal cuadrangular, con cuatro alas membranosas bien definidas, lo que les confiere rigidez y facilita su ascenso sobre soportes naturales o artificiales. Su coloración puede variar desde verde claro hasta tonalidades verde rojizas o violáceas, dependiendo del genotipo y de las condiciones ambientales. La superficie del tallo es generalmente lisa, y su crecimiento voluble permite a la planta maximizar la captación de luz solar, característica relevante para su alta tasa de acumulación de biomasa y reservas (Borges et al., 2016).

Las hojas (Figura 1c) son simples, opuestas (aunque ocasionalmente pueden observarse alternas), con una morfología acorazonada (cordada) o ligeramente hastada. Presentan pecíolos largos que facilitan su orientación hacia la luz y nervaduras prominentes de disposición palmada, típicas de la especie. El margen foliar es entero y el ápice generalmente puntiagudo. Estas hojas desempeñan un papel clave en la fotosíntesis y, por ende, en la síntesis y acumulación de carbohidratos que posteriormente se almacenan en los tubérculos (Borges et al., 2016).

El tubérculo (Figura 1d) constituye el órgano de mayor interés desde el punto de vista alimentario e industrial. Se desarrolla a partir de una estructura cormosa ubicada en la base del tallo, y su forma, tamaño y color dependen en gran medida del genotipo y de las condiciones de cultivo. Los tubérculos pueden ser grandes, de forma cilíndrica, globosa o lobulada, y presentarse de manera solitaria o en grupos (Wang et al., 2024).

Externamente, la piel del tubérculo suele ser de color marrón oscuro o casi negro, mientras que la pulpa puede variar desde blanco marfil hasta tonalidades púrpuras intensas, asociadas a la presencia de compuestos fenólicos y pigmentos

como las antocianinas. Estas variaciones no solo influyen en la aceptación sensorial del producto, sino también en su composición química y funcional, aspectos de interés para su procesamiento en la industria alimentaria (Lebot et al., 2019).

Dioscorea alata es una planta dioica, lo que significa que las flores masculinas y femeninas se encuentran en individuos separados. Las flores son pequeñas, unisexuales, de coloración verdosa a amarillenta y se agrupan en inflorescencias en forma de espigas. Aunque la floración no es abundante ni regular, especialmente bajo condiciones de cultivo, cuando ocurre da lugar a la formación de un fruto tipo cápsula trivalvada, que contiene semillas aladas adaptadas a la dispersión por el viento (Mondo et al., 2020).

La combinación de un sistema aéreo trepador altamente eficiente y un órgano subterráneo especializado en el almacenamiento de carbohidratos convierte a *Dioscorea alata* en una especie particularmente apta para la producción de almidón. Desde la perspectiva de la Ingeniería en Alimentos, su morfología influye directamente en el rendimiento de extracción, la calidad del almidón y las propiedades fisicoquímicas del mismo, lo que justifica el interés en esta especie como base para aplicaciones tecnológicas e industriales (Salcedo et al., 2018)



Figura 1 a) Enredadera trepadora de *D. alata* (herbarim, 2020); b) Tallos de *D. alata* (herbarim, 2020); c) Hojas de *D. alata* (herbarim, 2020); d) Tubérculo de *D. alata* (Álvarez, 2024).

5.2.3 Usos de *Dioscorea alata*

Dioscorea alata, comúnmente conocida como ñame de agua o ñame morado, es una de las especies del género *Dioscorea* con mayor relevancia alimentaria y tecnológica en regiones tropicales y subtropicales. Tradicionalmente, su principal uso ha sido como alimento básico, debido a su elevado contenido de carbohidratos complejos, principalmente almidón, lo que la convierte en una fuente importante de energía para millones de personas. No obstante, investigaciones recientes han demostrado que los usos de *D. alata* trascienden el consumo tradicional, posicionándola como una materia prima de interés para la industria alimentaria, nutracéutica y farmacéutica (González, 2012).

El tubérculo de *D. alata* se consume ampliamente en forma cocida, hervida, asada o frita, y constituye un componente fundamental de la dieta en diversas culturas de Asia, África y América Latina. Desde el punto de vista nutricional, el tubérculo se caracteriza por un alto contenido de almidón (60–80 % en base seca), además de fibra dietética, minerales y compuestos bioactivos, lo que explica su papel como alimento básico y su aceptación sensorial (Shajeela et al ., 2011).

En el ámbito del procesamiento de alimentos, el ñame puede transformarse en harinas, hojuelas, purés y productos fermentados, lo que amplía su vida útil y facilita su incorporación en formulaciones industriales. Estas presentaciones permiten su uso como ingrediente en productos horneados, sopas, salsas y alimentos reconstituidos, particularmente en regiones donde se busca sustituir parcial o totalmente harinas convencionales (Cortés, 2015).

Desde la perspectiva de la Ingeniería en Alimentos, uno de los usos más relevantes de *D. alata* es la obtención de almidón. El almidón extraído de este tubérculo presenta propiedades fisicoquímicas y funcionales favorables, como buena capacidad de gelatinización, estabilidad térmica y comportamiento reológico adecuado, lo que lo hace apto para su empleo como espesante, gelificante y estabilizante en diversos sistemas alimentarios (Liang et al., 2026).

Estudios recientes han mostrado que el almidón de *D. alata* puede presentar fracciones de almidón resistente y de digestión lenta, lo cual resulta de interés para el desarrollo de alimentos funcionales con bajo índice glucémico, orientados a poblaciones con trastornos metabólicos como la diabetes mellitus. Asimismo, la modificación física o química de este almidón amplía su potencial de aplicación en productos cárnicos, lácteos, salsas y alimentos instantáneos (Mawoneke et al., 2024)

Además de su valor energético, *D. alata* es reconocida por su contenido de compuestos bioactivos, entre los que destacan polifenoles, flavonoides, saponinas y fibra dietética, los cuales contribuyen a propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y reguladoras del metabolismo. Estas características han impulsado su estudio como ingrediente funcional y nutracéutico, tanto en forma de extractos como de ingredientes mínimamente procesados (Hou et al., 2022).

En particular, se ha documentado que los tubérculos de *D. alata* con pulpa morada contienen antocianinas, compuestos asociados con efectos antioxidantes y potenciales beneficios en la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles. Esto ha favorecido su inclusión en el diseño de alimentos con valor agregado y en productos orientados a la salud (Vishnu et al., 2023).

Las especies del género *Dioscorea* se caracterizan por su contenido de diosgenina, un sapogenino esteroidal que ha sido históricamente uno de los principales precursores vegetales para la síntesis industrial de hormonas esteroideas, como corticosteroides, anticonceptivos y hormonas sexuales. Aunque la concentración de diosgenina varía entre especies y cultivares, *D. alata* ha sido identificada como una fuente potencial de este compuesto, lo que refuerza su importancia farmacéutica (Moriya et al., 2015)

En la medicina tradicional, el tubérculo de *D. alata* se ha utilizado para el tratamiento de diversas afecciones, incluyendo enfermedades de la piel, trastornos gastrointestinales, inflamaciones y padecimientos metabólicos. Investigaciones científicas recientes respaldan parcialmente estos usos tradicionales, al demostrar que extractos y compuestos derivados de *D. alata* presentan actividad

antioxidante, antiinflamatoria, hipoglucemiante y cardioprotectora, aunque se enfatiza la necesidad de estudios clínicos más amplios para confirmar su eficacia terapéutica (Aung et al., 2020).

Por lo anterior, los usos de *Dioscorea alata* abarcan desde su papel como alimento básico hasta su aprovechamiento como fuente de almidón funcional, compuestos bioactivos y precursores farmacéuticos. Para la Ingeniería en Alimentos, esta versatilidad representa una oportunidad para el desarrollo de ingredientes innovadores, alimentos funcionales y productos con valor agregado, así como para el aprovechamiento integral de un recurso vegetal subutilizado (Kaviraj et al., 2022).

5.2.4 Composición química del tubérculo de *Dioscorea alata*

El tubérculo de *Dioscorea alata* se caracteriza por una composición química dominada por carbohidratos, principalmente almidón, lo que explica su amplia utilización como alimento básico y como materia prima para la obtención de biopolímeros de interés tecnológico. La composición proximal del tubérculo puede variar en función del genotipo, condiciones edafoclimáticas, estado de madurez y prácticas de cultivo, sin embargo, la literatura coincide en que el almidón constituye el componente mayoritario de la materia seca (Manu et al., 2009).

Diversos estudios han reportado que el contenido de materia seca del tubérculo de *D. alata* se sitúa generalmente entre 20 y 35 % en base fresca, con un contenido de humedad elevado (65–80 %), característica típica de raíces y tubérculos tropicales. Esta elevada humedad influye tanto en la estabilidad poscosecha como en la eficiencia de los procesos de extracción del almidón, por lo que su conocimiento resulta relevante desde el punto de vista tecnológico (Liang et al., 2026).

El almidón representa entre 60 y 80 % de la materia seca del tubérculo, siendo el principal responsable de su valor energético y de su interés industrial. Este

almidón está constituido por las fracciones clásicas de amilosa y amilopectina, cuya proporción influye directamente en las propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales del biopolímero. En *D. alata*, se han reportado contenidos de amilosa típicamente en el rango de 20–30 %, valores comparables o incluso superiores a los de otros almidones comerciales, lo que confiere características particulares de gelatinización, retrogradación y capacidad de retención de agua (Eyilan et al., 2022).

Desde la perspectiva de la modificación química con anhídrido octenil succínico (OSA), esta elevada concentración de almidón y la disponibilidad de grupos hidroxilo en su estructura hacen del almidón de *D. alata* un sustrato adecuado para reacciones de esterificación, permitiendo la introducción de grupos funcionales que modifican su comportamiento hidrofílico-hidrofóbico y amplían su rango de aplicaciones tecnológicas (Jiang et al., 2023).

El contenido de proteína cruda del tubérculo es relativamente bajo en comparación con el de leguminosas, pero se sitúa generalmente entre 4 y 9 % en base seca, contribuyendo de manera complementaria al valor nutricional del ñame. Estas proteínas, aunque no son el componente de mayor interés tecnológico, pueden influir en la interacción del almidón con el agua y otros componentes durante el procesamiento (Lebot et al., 2023).

La fibra dietética total suele encontrarse en intervalos de 4 a 12 % en base seca, dependiendo del cultivar y del método de análisis. La presencia de fibra contribuye a efectos fisiológicos positivos, como la reducción de la respuesta glucémica, y puede influir indirectamente en la funcionalidad del almidón al formar matrices complejas durante la gelatinización (Mawoneke et al., 2024).

El contenido de lípidos es bajo (generalmente <1 %), sin embargo, incluso pequeñas cantidades pueden interactuar con la amilosa formando complejos amilosa-lípido, los cuales pueden afectar la digestibilidad del almidón y sus propiedades térmicas, aspecto relevante cuando se consideran aplicaciones en alimentos funcionales (Tanimola et al., 2022).

El contenido de cenizas del tubérculo de *D. alata* suele oscilar entre 2 y 5 % en base seca, reflejando una riqueza mineral significativa. Entre los minerales mayoritarios destaca el potasio, seguido de fósforo, magnesio y calcio, mientras que minerales traza como zinc, manganeso, hierro y cobre se encuentran en concentraciones menores pero nutricionalmente relevantes. Este perfil mineral no solo refuerza el valor nutricional del tubérculo, sino que también puede tener implicaciones tecnológicas, ya que ciertos cationes pueden influir en el comportamiento térmico y reológico del almidón durante procesos de calentamiento, gelatinización y modificación química (Uthayakumaran et al., 2025).

El contenido de azúcares simples (glucosa, fructosa y sacarosa) en *D. alata* es relativamente bajo en comparación con el almidón, generalmente inferior al 10 % de la materia seca, lo que contribuye a un índice glucémico bajo o moderado en diversas preparaciones. Estudios recientes han confirmado que algunas variedades y métodos de cocción de *D. alata* presentan respuestas glucémicas reducidas, asociadas a una mayor proporción de almidón resistente y de digestión lenta, lo cual resulta de interés para el desarrollo de alimentos dirigidos a poblaciones con trastornos metabólicos como la diabetes mellitus (Eyinla et al., 2022; Liang et al., 2026).

Por lo tanto, la composición química del tubérculo de *Dioscorea alata*, caracterizada por un alto contenido de almidón, una proporción moderada de amilosa, bajo contenido lipídico y presencia de minerales, lo posiciona como una materia prima idónea para procesos de modificación química del almidón, como la esterificación con OSA. Estas características favorecen la eficiencia de la reacción, el control del grado de sustitución y la obtención de almidones modificados con propiedades funcionales mejoradas, tales como mayor capacidad de retención de agua, estabilidad térmica y comportamiento emulsionante, aspectos clave para su aplicación en la industria alimentaria (Uthayakumaran et al., 2025).

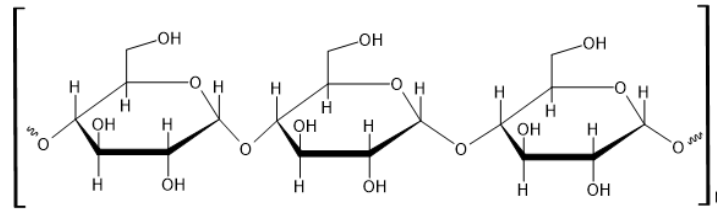
5.3 El almidón

El almidón es uno de los biopolímeros más abundantes en la naturaleza y constituye la principal forma de almacenamiento de energía en plantas, acumulándose en semillas, tubérculos, raíces y frutos inmaduros. Está formado por amilosa, un polímero lineal con enlaces $\alpha(1\rightarrow4)$ capaz de formar geles y complejos con lípidos, y amilopectina, altamente ramificada mediante enlaces $\alpha(1\rightarrow4)$ y $\alpha(1\rightarrow6)$, responsable de su solubilidad y viscosidad. La proporción entre ambas determina sus propiedades funcionales y su comportamiento durante procesos térmicos. Además de su papel biológico, el almidón es esencial en la industria alimentaria por su capacidad espesante, gelificante, estabilizante y texturizante, con variantes como almidones nativos, modificados y resistentes, este último con efectos prebióticos y beneficios metabólicos. Los fenómenos de gelatinización y retrogradación influyen en su funcionalidad y en la calidad de los productos que lo contienen, lo que permite su aplicación en sectores como el alimentario y cosmético (Villarroel y Gómez, 2018).

5.3.1 Composición química

El almidón nativo está formado por una mezcla de dos polisacáridos: amilosa y amilopectina (Figura 2), cuya proporción varía según la fuente vegetal. La amilosa es un polímero lineal de glucosa unido por enlaces glucosídicos $\alpha(1\rightarrow4)$. Su estructura helicoidal le confiere propiedades particulares, como la capacidad de formar geles y complejos con lípidos. Por el contrario la amilopectina es un polímero altamente ramificado, con enlaces glucosídicos $\alpha(1\rightarrow4)$ en la cadena lineal y $\alpha(1\rightarrow6)$ en los puntos de ramificación. Esta estructura le otorga solubilidad y capacidad de formar pastas viscosas. La proporción de amilosa y amilopectina determina las características funcionales del almidón nativo. Por ejemplo, los almidones con alto contenido de amilosa tienden a formar geles más firmes, mientras que los ricos en amilopectina generan texturas más suaves y pegajosas (Beech et al., 2022).

(a)



(b)

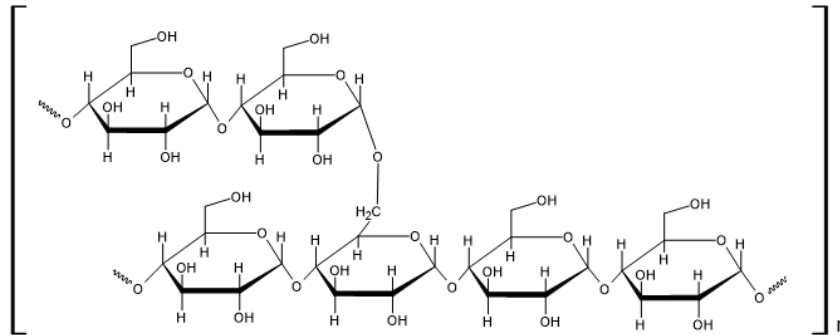


Figura 2. Estructura química de las fracciones que conforman la molécula de Almidón: (a) Amilosa; (b) Amilopectina.

5.3.2 Funciones biológicas y tecnológicas

En el ámbito biológico y tecnológico, el almidón es la reserva energética fundamental de todas las plantas, que lo sintetizan en los cloroplastos y lo almacenan en los amiloplastos. El almidón cumple diversas funciones tecnológicas siendo un buen emulsificante y estabilizante, además contribuye a la homogeneidad de mezclas en productos como salsas y cremas. Otra propiedad es la de funcionar como un mejorador de estructura que aporta volumen y textura en productos horneados como pan y pasteles. El almidón es un agente que aporta viscosidad, generando consistencia en sopas, pudines y pastas. Además es una fuente de energía para la dieta humana, siendo el principal carbohidrato complejo, base de la alimentación en muchas culturas (Alcazar y Meireles, 2015).

5.3.3 Tipos de almidones en la industria alimentaria

El almidón es un polisacárido ampliamente utilizado en la industria alimentaria debido a sus propiedades funcionales como espesante, gelificante, estabilizante y agente de textura. Su desempeño depende del tipo de almidón empleado, ya que cada variante presenta características estructurales y funcionales específicas que determinan su aplicación tecnológica (Pacheco y Techeira, 2009; Sarka et al., 2023).

Entre los tipos más comunes se encuentran el almidón nativo, el modificado y el no convencional; sin embargo, en años recientes ha cobrado especial relevancia el almidón resistente (RS) por sus implicaciones nutricionales y tecnológicas. El almidón resistente se clasifica en cuatro tipos principales según su origen y mecanismo de resistencia a la digestión. El RS1 corresponde al almidón físicamente inaccesible, atrapado en matrices alimentarias como granos enteros o leguminosas. El RS2 incluye almidones con estructura granular naturalmente resistente, como los de plátano verde o papa cruda. El RS3 se forma tras procesos de gelatinización y enfriamiento, donde la retrogradación genera estructuras recristalizadas menos digestibles. El RS4, por su parte, se obtiene mediante modificaciones químicas que alteran los enlaces del polímero, incrementando su resistencia en el tracto digestivo. Estos tipos de RS han sido asociados con beneficios para la salud, como la regulación de la glucosa, la mejora de la microbiota intestinal y la reducción del riesgo de enfermedades metabólicas (Kim et al., 2025).

Los procesos térmicos a los que se someten los almidones durante la elaboración de alimentos provocan su gelatinización, y posteriormente, durante el enfriamiento y almacenamiento, ocurre la retrogradación, fenómeno que puede incrementar la formación de RS3. Estas transformaciones influyen en la textura, estabilidad y vida útil de los productos, por lo que almidones nativos de distintas fuentes pueden aportar propiedades funcionales diferenciadas y generar aplicaciones específicas en industrias como la alimentaria, cosmética y farmacéutica (Bernal y Martínez, 2008).

Dado que las propiedades funcionales del almidón pueden modificarse para mejorar su desempeño en matrices alimentarias, resulta necesario analizar los procesos mediante los cuales se altera su estructura. En este contexto, la modificación química del almidón constituye una herramienta clave para optimizar su comportamiento tecnológico y ampliar sus aplicaciones industriales (Hernández y Ramos, 2024).

5.3.4 Almidones químicamente modificados

Los almidones químicamente modificados son aquellos cuya estructura molecular ha sido alterada mediante reacciones controladas con el fin de mejorar o adaptar sus propiedades funcionales para aplicaciones específicas en la industria alimentaria y otros sectores productivos. A diferencia del almidón nativo, cuya funcionalidad depende de su origen botánico y de su proporción de amilosa y amilopectina, los almidones modificados presentan características mejoradas en términos de estabilidad térmica, resistencia al cizallamiento, tolerancia a variaciones de pH y capacidad de formar geles o emulsiones más estables. Estas modificaciones permiten superar limitaciones del almidón nativo, especialmente en procesos donde se requieren condiciones extremas de temperatura, acidez o agitación (Singh et al., 2007).

Las principales modificaciones químicas incluyen la esterificación, eterificación, reticulación y oxidación, cada una con efectos específicos sobre la estructura del almidón. La esterificación introduce grupos funcionales que pueden mejorar la estabilidad frente a la retrogradación y favorecer la formación de emulsiones. La eterificación modifica la hidrofobicidad o hidrofiliidad del almidón, ampliando su uso en sistemas alimentarios y no alimentarios. La reticulación genera enlaces entre cadenas de glucosa, aumentando la resistencia del almidón a la ruptura durante el calentamiento o el mezclado. Por su parte, la oxidación reduce el peso molecular y puede mejorar la claridad de las pastas, así como su capacidad para formar películas (Kaur et al., 2012).

Estas modificaciones permiten obtener almidones con propiedades específicas para productos como salsas, bebidas, aderezos, productos horneados, alimentos instantáneos y sistemas emulsionados. Además, los almidones químicamente modificados pueden presentar comportamientos funcionales que no se encuentran en los almidones nativos, lo que los convierte en aditivos alimentarios estratégicos para el desarrollo de productos con características sensoriales y tecnológicas mejoradas (Galkowska et al., 2023).

Entre los almidones modificados más utilizados se encuentran aquellos tratados con anhídrido octenil succínico (OSA), los cuales han adquirido gran relevancia debido a su capacidad para actuar como agentes emulsionantes y estabilizantes en sistemas alimentarios complejos. Dado su importancia creciente en la industria, el siguiente capítulo profundiza específicamente en las características, mecanismos de modificación y aplicaciones del almidón modificado con OSA (Olawoye et al., 2023).

5.4 Almidón Modificado con Anhídrido Octenil Succínico

El Anhídrido Octenil Succínico (OSA) es un compuesto derivado de ácidos dicarboxílicos ampliamente utilizado para la modificación química de almidones. Desde el punto de vista estructural, el OSA contiene una cadena alquílica de ocho carbonos (octenilo) unida a un grupo succínico, lo que le confiere un carácter anfifílico. Esta dualidad hidrofílica y lipofílica, permite que el almidón modificado con OSA interactúe tanto con moléculas polares como con compuestos hidrofóbicos, otorgándole propiedades funcionales que no se encuentran en los almidones nativos (Olawoye et al., 2023).

Si bien el almidón nativo es un ingrediente valioso por su capacidad espesante y gelificante, presenta limitaciones tecnológicas importantes, como baja resistencia al cizallamiento, susceptibilidad a la descomposición térmica y una marcada tendencia a la retrogradación. Estas características restringen su desempeño en procesos industriales que requieren estabilidad durante el calentamiento, mezclado o almacenamiento. La modificación química surge como una alternativa

para superar estas limitaciones y ampliar el intervalo de aplicaciones del almidón (Compart et al., 2023).

La obtención de almidón modificado con OSA se realiza mediante reacciones de esterificación, en las cuales el anhídrido se une a los grupos hidroxilo del almidón (Figura 3). Este proceso introduce sustituyentes octenil succinato en la molécula, reduciendo su hidrofobicidad natural y generando una estructura anfipática. Como resultado, el almidón OSA presenta una mayor capacidad para estabilizar emulsiones, mejorar la dispersión de lípidos y aumentar la estabilidad de sistemas alimentarios complejos. Estas propiedades han impulsado su uso en una amplia variedad de productos, incluyendo bebidas, aderezos, microencapsulados, sistemas emulsionados y alimentos instantáneos (Altuna y Herrera, 2018).

Por lo anterior, la modificación con anhídrido octenil succínico representa una estrategia eficaz para mejorar la funcionalidad del almidón y adaptarlo a las exigencias de la industria alimentaria moderna.

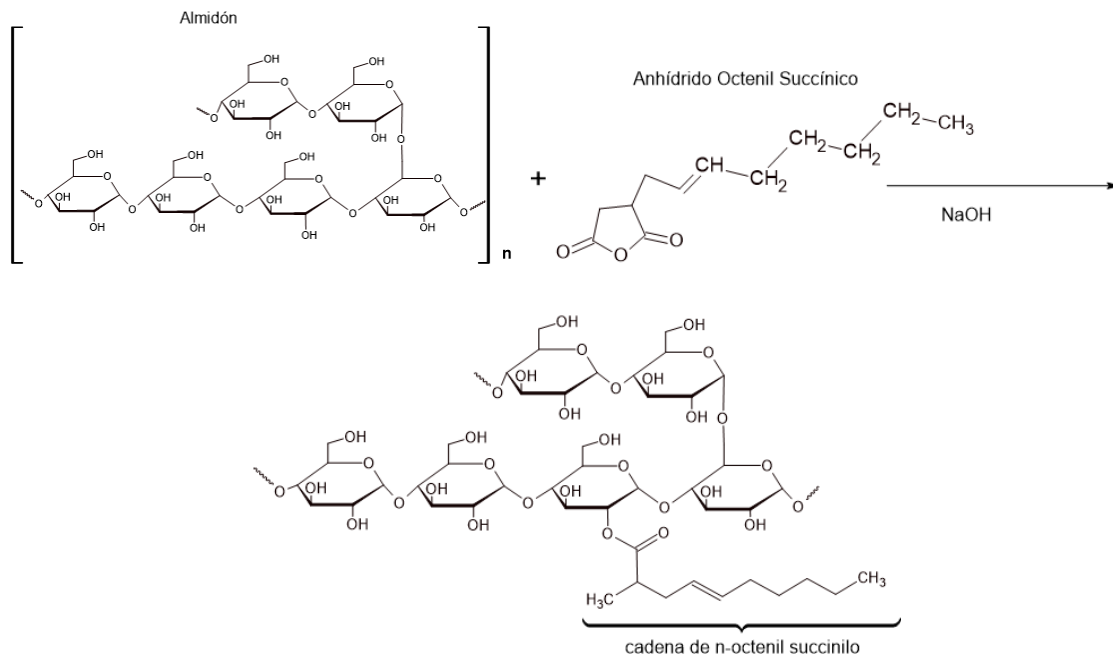


Figura 3 Reacción del almidón con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) para obtener almidón modificado

5.5 Grado de esterificación (DS)

El grado de esterificación (DS) es un parámetro fundamental para caracterizar almidones sometidos a reacciones de modificación química, ya que expresa la proporción de grupos hidroxilo del almidón que han sido sustituidos por grupos funcionales provenientes del agente esterificante. Este valor cuantifica la extensión de la reacción y permite predecir cambios en propiedades como solubilidad, hinchamiento, estabilidad térmica, comportamiento en emulsiones y resistencia a la retrogradación (Singh et al., 2007).

En el caso de almidones modificados con anhídrido octenil succínico (OSA), el DS determina la cantidad de grupos octenil succinato incorporados en la molécula, lo que influye directamente en su carácter anfifílico y en su desempeño como agente emulsionante (Shogren, 2003).

La esterificación del almidón ocurre cuando los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa reaccionan con el anhídrido, formando enlaces éster y liberando subproductos como agua o ácidos carboxílicos. La eficiencia de esta reacción depende de variables como el pH, la temperatura, la relación molar del reactivo, el tiempo de reacción y la accesibilidad de los grupos hidroxilo, la cual está influenciada por la estructura granular y el contenido de amilosa del almidón (León et al., 2020).

Estudios han demostrado que almidones con mayor proporción de amilosa tienden a presentar valores más altos de DS debido a la mayor disponibilidad de grupos reactivos expuestos (Zhang et al., 2024).

Diversos trabajos han evaluado el comportamiento del DS bajo diferentes condiciones de modificación. Hu et al. (2015) reportaron que el almidón puede alcanzar valores de esterificación relativamente altos en tiempos cortos de reacción, incrementándose progresivamente conforme se prolonga el proceso, hasta llegar a un punto donde la degradación del polímero comienza a competir con la esterificación. Otros autores han señalado que el uso de tecnologías no convencionales, como ultrasonido, microondas o extrusión, puede mejorar la

difusión del reactivo y aumentar el DS en comparación con métodos tradicionales (Kaur et al., 2012). Sin embargo, el DS debe mantenerse dentro de los límites establecidos por organismos regulatorios como el Codex Alimentarius, que especifica valores máximos permitidos para almidones OSA destinados a uso alimentario (Codex, 2019).

El control del grado de esterificación es esencial para garantizar la funcionalidad del almidón modificado y su comportamiento en aplicaciones tecnológicas específicas. Comprender cómo las condiciones de reacción influyen en el DS permite optimizar procesos de modificación y seleccionar parámetros adecuados para obtener almidones con propiedades mejoradas. Esta relación entre el DS y las características funcionales del almidón es especialmente relevante en el caso del almidón modificado con anhídrido octenil succínico, abordado en la sección anterior.

5.6 Capacidad de Retención de Agua (CRA) del almidón

La Capacidad de Retención de Agua (CRA) es una propiedad funcional fundamental del almidón y de otros biopolímeros utilizados en la industria alimentaria, ya que influye directamente en la textura, jugosidad, viscosidad, estabilidad y rendimiento de los productos. La CRA se define como la cantidad de agua que un material puede retener bajo condiciones específicas, y depende de factores intrínsecos como la estructura granular, el contenido de amilosa y amilopectina, el grado de cristalinidad y la presencia de grupos hidrofílicos capaces de formar enlaces de hidrógeno con el agua, y de factores extrínsecos como la temperatura (Kohn et al., 2015).

La estructura del gránulo de almidón desempeña un papel determinante en su capacidad para retener agua. Gránulos con mayor proporción de regiones amorfas permiten una mayor penetración de agua, mientras que los dominios cristalinos restringen este proceso debido a su ordenamiento molecular más compacto. Asimismo, la CRA se ve influenciada por el origen botánico del almidón, ya que

diferencias en tamaño de gránulo, distribución de cadenas y composición química generan variaciones significativas en su comportamiento funcional (Pérez y Bertoft, 2010).

Los procesos tecnológicos también modifican la CRA. Durante la gelatinización, el calentamiento en presencia de agua rompe la estructura cristalina del gránulo, permitiendo el hinchamiento y aumentando la disponibilidad de sitios de unión con el agua (Ratnayake y Jackson, 2009). Por otro lado, modificaciones químicas como la acetilación, la oxidación o la esterificación con anhídrido octenil succínico (OSA) introducen grupos funcionales adicionales que incrementan la afinidad del almidón por el agua y reducen la retrogradación, mejorando su estabilidad durante el almacenamiento (Kaur et al., 2012).

Diversos estudios han evaluado la CRA en almidones nativos y modificados. Torres et al. (2015) reportaron que la CRA del almidón de malanga aumentó con la temperatura debido al hinchamiento progresivo de los gránulos durante la gelatinización. Otros trabajos han demostrado que almidones acetilados o esterificados presentan mayor CRA que sus contrapartes nativas, debido a la presencia de grupos funcionales que reducen la interacción entre cadenas y facilitan la incorporación de agua (Lawal et al., 2011), por lo que la evidencia científica demuestra que la capacidad de retención de agua está estrechamente relacionada con la estructura química y supramolecular del almidón, así como con las condiciones de procesamiento. Comprender estos factores es esencial para optimizar su desempeño en aplicaciones alimentarias, donde la CRA determina la calidad sensorial, la estabilidad y la funcionalidad de una amplia variedad de productos.

5.7 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica ampliamente utilizada para la identificación y caracterización de estructuras moleculares en sistemas biológicos, químicos y alimentarios. Su

principio se basa en la absorción de radiación infrarroja por parte de los enlaces químicos, cuyas vibraciones de estiramiento, flexión o torsión generan un espectro característico que funciona como una “huella digital molecular” del compuesto analizado. Cada grupo funcional presenta bandas de absorción específicas dentro del espectro infrarrojo, lo que permite identificar componentes, evaluar interacciones intermoleculares y detectar modificaciones estructurales (Ahmad y Ayub, 2022).

La FTIR ha adquirido relevancia en la ciencia de los alimentos debido a su rapidez, sensibilidad y carácter no destructivo. Se utiliza para estudiar carbohidratos, lípidos, proteínas y compuestos bioactivos, así como para monitorear procesos como gelatinización, retrogradación, oxidación y esterificación en matrices alimentarias. Además, permite evaluar adulteraciones, autenticidad y calidad de productos, lo que la convierte en una herramienta esencial en laboratorios de investigación y control de calidad (Cozzolino, 2015).

Existen diferentes modos de medición en FTIR, entre los cuales destacan la transmisión, la reflexión difusa (DRIFT) y la reflexión total atenuada (ATR). El modo ATR ha revolucionado el análisis de alimentos al permitir la evaluación directa de muestras sólidas, semisólidas o líquidas sin preparación compleja, gracias al uso de cristales como diamante y germanio que facilitan la penetración de la onda evanescente en la superficie del material. Esta versatilidad ha impulsado su aplicación en el estudio de almidones (Keshavarzi et al., 2019).

En el caso particular del almidón, la FTIR permite identificar grupos funcionales característicos como O–H, C–H, C–O y C–O–C, así como evaluar cambios estructurales asociados a procesos de modificación física o química. Investigaciones recientes han demostrado que la FTIR es útil para monitorear la esterificación, oxidación y formación de almidón resistente, ya que las bandas asociadas a carbonilos, hidroxilos y enlaces éster muestran desplazamientos o variaciones en intensidad tras la modificación (Fonseca et al., 2018).

Estudios aplicados, como el de Salmón (2023), han utilizado FTIR para comparar almidones nativos y modificados, identificando diferencias en las bandas

correspondientes a grupos hidroxilo, carbonilo y metilo, lo que evidencia cambios en la organización molecular del polisacárido. Estos análisis permiten confirmar la presencia o ausencia de reacciones químicas específicas, así como evaluar la interacción entre cadenas y la formación de nuevas estructuras.

Por lo tanto, la FTIR se ha consolidado como una herramienta indispensable para el estudio de almidones, ya que proporciona información detallada sobre su composición, estructura y modificaciones, contribuyendo al desarrollo de ingredientes funcionales

5.8 Difracción de Rayos X (XRD)

La Difracción de Rayos X (XRD) es una técnica analítica fundamental para el estudio de la estructura cristalina de materiales, ampliamente utilizada en ciencia de alimentos. Su principio se basa en la interacción de un haz de Rayos X con los planos cristalinos de un sólido, generando un patrón de difracción que depende de la distancia interplanar y del arreglo tridimensional de los átomos. Este fenómeno se describe mediante la Ley de Bragg, que relaciona la longitud de onda de la radiación con el ángulo de difracción y la distancia entre planos cristalinos. Debido a que cada material cristalino presenta un patrón único, la XRD funciona como una herramienta de identificación estructural comparable a una “huella digital” (Cullity y Stock, 2014).

En el ámbito alimentario, la XRD se utiliza para caracterizar la cristalinidad de carbohidratos, así como para estudiar transiciones estructurales inducidas por procesos térmicos, mecánicos o químicos. En el caso del almidón, la técnica permite distinguir entre los patrones cristalinos tipo A, B y C, asociados a diferentes fuentes botánicas y grados de hidratación. Asimismo, la XRD es útil para evaluar cambios en la organización cristalina durante procesos como gelatinización, retrogradación, extrusión y modificación química, proporcionando información clave sobre la funcionalidad del polímero (Wu et al., 2019).

La instrumentación moderna de XRD incluye fuentes de Rayos X basadas en tubos sellados, ánodos rotatorios y, en aplicaciones avanzadas, radiación sincrotrón, que ofrece mayor intensidad y resolución. En ciencia de alimentos, los modos de medición más utilizados son el polvo policristalino y el mapeo de difracción, que permiten analizar muestras heterogéneas sin necesidad de preparación compleja. La técnica es especialmente valiosa para estudiar la cristalinidad relativa, parámetro que influye en propiedades como solubilidad, digestibilidad, estabilidad térmica y comportamiento reológico (Reddy y Reddy, 2025).

Diversos estudios han demostrado la utilidad de la XRD para evaluar almidones modificados. Por ejemplo, Luo et al., (2021) reportaron que la esterificación con anhídrido octenil succínico (OSA) tiende a disminuir la cristalinidad debido a la sustitución en regiones amorfas del gránulo. Además, se observó que la incorporación de grupos funcionales altera la organización interna sin modificar necesariamente el tipo de patrón cristalino. Esto coincide con los hallazgos de Lee et al., (2024), quienes analizaron almidón de trigo nativo y modificado con OSA y encontraron que ambos conservaron el patrón tipo A, con picos característicos en 15° , 17° , 18° y 23° (2θ), aunque la cristalinidad disminuyó de 39.9% en el almidón nativo a valores entre 31.2% y 30.7% en los modificados.

Estos resultados sugieren que la modificación química afecta principalmente la región amorfa del almidón, reduciendo su orden estructural sin alterar la forma básica del patrón cristalino. Por ello, la XRD se consolida como una herramienta indispensable para comprender cómo los tratamientos físicos y químicos modifican la organización interna del almidón y, en consecuencia, sus propiedades funcionales en aplicaciones alimentarias.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materia prima

Los tubérculos de *Dioscorea alata* empleados en este estudio fueron recolectados de forma aleatoria en varios predios agrícolas del municipio de Zapotitlán de Méndez, ubicado en la Sierra Norte del estado de Puebla, México. Esta región se caracteriza por su diversidad agrícola y condiciones favorables para el cultivo de especies tradicionales como el ñame.

Geográficamente, el municipio se localiza entre los paralelos 19° 58' 10" y 20° 01' 36" de latitud Norte, y los meridianos 97° 38' 36" y 97° 44' 24" de longitud Occidental, lo que permite ubicar con precisión el origen de la materia prima utilizada en la investigación.

6.2 Extracción del almidón

La extracción del almidón de *Dioscorea alata* se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Hernández-Uribe et al., (2020), con adecuaciones menores para este estudio. Los tubérculos de *Dioscorea alata* fueron lavados cuidadosamente con agua potable y un cepillo de cerdas duras con el fin de eliminar tierra y otras impurezas superficiales. Posteriormente, se retiró completamente el exocarpo utilizando un cuchillo de acero inoxidable.

Una vez pelados, los tubérculos se cortaron en cubos de aproximadamente 3.0–5.0 cm por lado. Estos cubos se sumergieron en una solución de ácido cítrico al 3.0% (p/v) durante 5.0 min para evitar el pardeamiento enzimático. Transcurrido el tiempo de inmersión, la mezcla se sometió a molienda en una licuadora doméstica (Oster, modelo BLSTBPST-013, México) hasta obtener una suspensión homogénea. La suspensión se filtró utilizando una manta de cielo de 1 m², realizando simultáneamente lavados con agua destilada para favorecer la recuperación del almidón.

El filtrado obtenido se pasó primeramente por un tamiz de malla 100 (Montiel Inoxidables, México; apertura de 149 μm) y posteriormente por un tamiz de malla 325 (Grupo FIICSA, México; apertura de 45 μm). El filtrado final se dejó reposar durante 4.0 h para permitir la sedimentación del almidón.

Una vez sedimentado, el sobrenadante se retiró cuidadosamente por decantación. El almidón se sometió a dos lavados más con agua destilada, utilizando 5.0 L por cada lavado y permitiendo un reposo de 8.0 h. Después de la segunda decantación, se observó la formación de una capa superficial de color amarillo-cremoso, la cual se eliminó mediante el tercer lavado, con un tiempo de reposo de 12 h, seguido de una decantación cuidadosa para evitar la pérdida de almidón.

Finalmente el almidón sedimentado se transfirió a charolas de aluminio desechables de 20 cm^2 (ULINE, S-22408, México) y se secó en una estufa de aire forzado (ICB, modelo HSF102955, México) a 45 °C durante 48 h, hasta eliminar completamente la humedad residual, cumpliendo el tiempo establecido dentro de la estufa, se retiró de las charolas y se trituró con ayuda de morteros de porcelana de 420.0 mL.

Para obtener el rendimiento de almidón se utilizó la ecuación 1, y se expresó en porcentaje.

$$\eta = \frac{D}{M} * 100 \dots \text{ecuación (1)}$$

Dónde: η es el rendimiento de almidón expresado en porcentaje; D es el peso seco del almidón; M es el peso inicial de los tubérculos sin hexocarpio (Hernández-Urbe et al., 2020).

6.3 Modificación del almidón de *Dioscorea alata* con Anhídrido Octenil Succínico (OSA)

La modificación química del almidón nativo de *Dioscorea alata* se realizó empleando Anhídrido Octenil Succínico (OSA), siguiendo la metodología descrita por Estrada-Fernández et al., (2021). Todas las muestras fueron preparadas por duplicado.

Se pesaron 20 g de almidón nativo (en base seca) y se dispersaron en 40 mL de agua destilada, obteniendo una suspensión al 30 % (p/p). La suspensión se mantuvo bajo agitación continua para asegurar una hidratación uniforme del almidón.

La modificación se llevó a cabo utilizando cuatro concentraciones de OSA: 0.6, 1.2, 2.4 y 3.0 % (p/p respecto al almidón seco) respectivamente. Cada concentración se dejó reaccionar durante 2.0, 4.0 y 6.0 h durante todo el proceso de la reacción, el pH se mantuvo constante a 8.5 con la adición controlada de una solución de NaOH 0.1 M. El pH se monitoreó de manera continua para asegurar que permaneciera dentro del valor establecido. Una vez concluido el tiempo de reacción, esta se neutralizó ajustando el pH a 6.5 mediante la adición de HCl 0.5 M.

A la suspensión resultante se le adicionaron 190.0 g de agua destilada. Posteriormente, la suspensión se centrifugó a 5000 rpm durante 7 min. El sobrenadante se eliminó por decantación y el sedimento se resuspendió en 350 g de agua destilada. La suspensión se centrifugó bajo las mismas condiciones. El sobrenadante fue retirado por segunda ocasión y el sedimento fue resuspendido en 300 mL de acetona pura. De igual manera, fue centrifugado a 5000 rpm pero con un tiempo de 5 min.

Finalmente, el sobrenadante se decantó y el sedimento final se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 h. Posteriormente, el almidón modificado se colocó en un secador convectivo (ECOSHEL, FA-45B, México) a 45 °C durante 4 h. Una vez concluido el secado, el material se mantuvo a temperatura ambiente durante 2 días para permitir el equilibrio de la humedad del medio ambiente con el almidón modificado (Estrada-Fernández et al., 2021).

6.4 Determinación del Grado de esterificación del almidón (DS)

El grado de esterificación (DS) del almidón modificado se determinó mediante titulación, siguiendo el método descrito por Estrada-Fernández et al., (2021). Para cada tratamiento se realizaron análisis por duplicado.

Se pesaron 5.0 g de almidón modificado (base seca) utilizando una balanza analítica (ADAM, PW124, México). La muestra se dispersó en 25.0 mL de una solución de HCl 2.5 M preparada en alcohol isopropílico, manteniéndose bajo agitación magnética durante 30 min para favorecer la ruptura de los enlaces y la liberación de los grupos sustituidos (Hidroxilos por octenil succinato).

Transcurrido este tiempo, se añadieron 100 mL de una solución acuosa de alcohol isopropílico al 90 % (v/v) y la mezcla se agitó durante 10 min adicionales. La suspensión resultante se filtró empleando papel filtro Whatman No. 1. El residuo sólido se lavó tres veces con 50.0 mL de alcohol isopropílico al 90 % (v/v) para eliminar restos de reactivos no reaccionados.

El almidón recuperado se dispersó posteriormente en 300 mL de agua destilada y la suspensión obtenida se colocó en un baño María (PolyScience, WD05DG1B, EE.UU.) a temperatura de ebullición del agua (aproximadamente 100 °C) durante 20 min, con el fin de asegurar la completa solubilización de los grupos funcionales susceptibles de titulación. La solución se dejó enfriar a temperatura ambiente y se procedió a la titulación con una solución valorada de NaOH 0.1 M (Lab Grade, México) utilizando fenolftaleína (Nova-Tech International EE.UU.) como indicador.

El grado de esterificación se calculó mediante la Ecuación 2, y se expresó en porcentaje (Estrada- Fernández et al., 2021).

$$DS = \frac{0.162\left(\frac{A*M}{P}\right)}{1-(0.210\left(\frac{A*M}{P}\right))} * 100 \dots \text{Ecuación 2}$$

Dónde: DS es el Grado de esterificación del almidón expresado en porcentaje; A es el NaOH gastado en la titulación expresado en mL; M es la Molaridad del NaOH; P es la masa del almidón utilizado, expresado en gramos (Estrada-Fernández et al., 2021).

6.5 Determinación de la Capacidad de Retención de Agua (CRA)

La Capacidad de Retención de Agua (CRA) se evaluó en almidón nativo y en las muestras modificadas con OSA a concentraciones de 0.6 %, 1.2 %, 2.4 % y 3.0 %. Esta prueba se usa para determinar la habilidad de los gránulos de almidón para absorber agua y formar un gel. Se preparó una suspensión al 1 % (p/p) de almidón en 20 mL de agua destilada. La mezcla se homogenizó utilizando un Vortex (Fisher Scientific, G-560, España) hasta obtener una suspensión uniforme.

Las suspensiones se sometieron a tratamientos térmicos a diferentes temperaturas: 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 y 95 °C, empleando un baño María (PolyScience, WD05DG1B, EE.UU.). Durante el calentamiento, las suspensiones se agitaron cada 5 min durante un total de 15 min utilizando el mismo equipo Vortex.

Posteriormente, las suspensiones se centrifugaron a 2300 rpm durante 15 min en una centrifuga (Labogene, 1248R, Corea), utilizando tubos cónicos de polipropileno. Después de la centrifugación, se decantó cuidadosamente el sobrenadante y se registró su peso en una balanza analítica (ADAM, PW124, México). El sedimento también fue pesado bajo las mismas condiciones.

Los valores obtenidos se emplearon para calcular la Capacidad de Retención de Agua, expresada en g de agua retenida por g de muestra seca, utilizando la Ecuación 3:

$$CRA = \frac{Pg - Pm}{Pm} \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde: CRA es la Capacidad de Retención de Agua; P_g es el peso del sedimento en gramos y P_m es el peso de la suspensión expresado en gramos.

6.6 Método para Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis espectroscópico del almidón nativo y modificado de *Dioscorea alata*, se realizó mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), siguiendo el procedimiento descrito por Wang et al., (2021). Se evaluaron las muestras modificadas a concentraciones de 1.2 %, 2.4 % y 3.0 % de OSA, correspondientes a un tiempo de reacción de 2 h.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un espectrómetro FTIR (Spectrum Two, PerkinElmer, EE.UU.). Antes del análisis, cada muestra se secó y pulverizó finamente para asegurar una adecuada interacción con el haz infrarrojo. Posteriormente, se colocó directamente en el accesorio del equipo, cuidando que la superficie de contacto fuera uniforme para evitar interferencias en la lectura.

Para cada muestra se registraron 256 barridos, con una resolución espectral de 4 cm^{-1} . El rango de análisis comprendió números de onda entre 4000 y 400 cm^{-1} , región en la cual se encuentran las bandas características asociadas a los grupos funcionales del almidón y a las modificaciones químicas introducidas por el OSA. Los espectros obtenidos se expresaron en porcentaje de transmitancia.

Este análisis permitió identificar cambios estructurales asociados a la esterificación del almidón, particularmente en las regiones correspondientes a vibraciones de enlaces C=O, C–O y grupos alquílicos introducidos durante la modificación.

6.7 Método para la Difracción de Rayos X

La cristalinidad del almidón nativo y del almidón modificado de *Dioscorea alata* se determinó mediante Difracción de Rayos X (DRX) (BRUKER D2 PHAER XRD DIFRACTOMETER CON CU K α RADIATION OF ($\lambda=1.54178\text{\AA}$), GERMANI). Se analizaron las muestras modificadas con OSA a concentraciones de 0.6 %, 1.2 %, 2.4 % y 3.0 %. Antes del análisis, cada muestra se secó a 40 °C para eliminar la humedad residual sin alterar la estructura cristalina. Posteriormente, se tamizó para obtener un tamaño de partícula uniforme (malla 100) y se montó en el porta-muestras para polvos, procurando evitar una orientación preferencial de los cristales.

El análisis se realizó utilizando radiación de cobre (Cu K α), en un intervalo de 2θ de 5° a 40–50°, con un tamaño de paso de 0.020° y tiempos de conteo entre 1 y 3 s por punto. Para mejorar la resolución en regiones específicas del difractograma, se efectuaron barridos finos adicionales desde 2.50° con incrementos de 0.010°. Durante la medición, la muestra se mantuvo en rotación continua con el fin de reducir efectos de orientación. El equipo fue calibrado previamente utilizando un patrón estándar certificado.

Los difractogramas obtenidos se procesaron mediante corrección de línea base y eliminación de la contribución amorfa. Se identificaron los picos característicos asociados a los diferentes tipos de cristalinidad del almidón (A, B o C), comparando con patrones reportados en la literatura. La cristalinidad relativa se calculó como la relación entre el área correspondiente a las regiones cristalinas y el área total (cristalina + amorfa) del difractograma.

Finalmente, se documentaron las condiciones de preparación de las muestras, los parámetros instrumentales utilizados, el tipo de patrón cristalino identificado y el índice de cristalinidad obtenido para cada concentración de OSA evaluada.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Rendimiento de obtención del almidón de *Dioscorea alata*

En la Tabla 1 se muestra el rendimiento de obtención del almidón de *Dioscorea alata*. Restrepo et al., (2022), reportaron un valor de 21.78% en condiciones similares de extracción, resultando un valor inferior al obtenido en este trabajo (43.43%). Esta diferencia puede atribuirse a factores como la variedad botánica, el contenido de materia seca de los tubérculos y las condiciones agronómicas de cultivo, aspectos que influyen directamente en la concentración de almidón disponible. Estudios previos han mostrado que los rendimientos de almidón en especies de *Dioscorea* suelen oscilar entre 20 y 35% (Hoover, 2001; Luo et al., 2021), por lo que el valor alcanzado en esta investigación se ubica en el rango superior, sugiriendo una mayor eficiencia en el proceso de aislamiento o una composición intrínseca más favorable de la materia prima utilizada. Este hallazgo es relevante desde el punto de vista tecnológico, ya que un mayor rendimiento implica una fuente más rentable de almidón para aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y de biopolímeros, posicionando a la variedad estudiada como una alternativa competitiva frente a otras fuentes convencionales como maíz o papa.

Tabla 1 Rendimiento de obtención del almidón de *Dioscorea alata* expresado en porcentaje.

Variables	<i>Dioscorea alata</i>
Peso de almidón seco (g)	26.60
Peso inicial de los tubérculos (g)	61.24
Rendimiento %	43.43

7.2 Modificación del almidón de *Dioscorea alata* con Anhídrido Octenil Succínico

En la Figura 4 se muestra la evolución del Grado de esterificación (DS) del almidón nativo de *Dioscorea alata* modificado con diferentes concentraciones de Anhídrido Octenil Succínico (OSA) a través del tiempo. Se observó una diferencia estadística ($p \leq 0.05$) entre el grado de esterificación con OSA y el tiempo de reacción. Los resultados evidencian una relación directa entre la concentración de OSA empleada y el incremento del DS.

Se observó que el tratamiento con 3.0% de OSA mostró los valores más elevados de DS (alrededor de 0.02 %) en comparación con los tratamientos de las concentraciones menores de OSA 0.6%, 1.2% y 2.4%. Este comportamiento confirma que la disponibilidad de grupos anhídrido favorece la sustitución de los grupos hidroxilo presentes en la estructura del almidón, lo cual concuerda con lo reportado en almidones de maíz y papa modificados con OSA, donde se ha documentado un incremento proporcional del DS con la concentración del Anhídrido Octenil Succínico (Zhang et al., 2021; Wang et al., 2025).

El DS aumentó progresivamente con el tiempo de reacción cuando se usó 2.4% de OSA (0.010 a 0.019 %) y 3% de OSA (0.020 a 0.021 %), esta tendencia no fue la misma en concentraciones más bajas de OSA (0.6 y 1.2 %). La pendiente se reduce conforme avanza el tiempo, sugiriendo que la reacción se aproxima a un límite de saturación de los sitios reactivos. Este fenómeno ha sido descrito previamente en estudios de almidón de arroz y trigo, donde la esterificación con OSA alcanza un equilibrio químico después de cierto tiempo de reacción (Zhang et al., 2021).

La diferencia entre 0.6% y 1.2% es moderada, mientras que el salto hacia 2.4% y 3.0% es más marcado. Este patrón es consistente con la literatura, donde se ha señalado que concentraciones intermedias de OSA pueden ser óptimas para lograr un balance entre funcionalidad y costos de producción (Zhang et al., 2021).

El incremento del DS tiene repercusiones directas en las propiedades funcionales del almidón tales como una mayor estabilidad frente a procesos industriales ya que un DS elevado confiere mayor resistencia a la retrogradación y mejora la estabilidad frente a ciclos de congelación-descongelación, lo cual es ventajoso en la formulación de productos congelados y salsas. También un DS elevado puede modificar la digestibilidad del almidón, generando fracciones de almidón resistente que contribuyen a la reducción del índice glucémico y a beneficios funcionales en la dieta (Zhang et al., 2021).

La introducción de grupos hidrofóbicos mediante OSA permite que el almidón actúe como emulsificante en sistemas alimentarios, favoreciendo la dispersión de lípidos en bebidas y productos lácteos (Wang et al., 2024).

Estos resultados indican que en la concentración de 3.0 % de OSA, el incremento del grado de esterificación fue menos pronunciado con el tiempo, lo que podría atribuirse a una posible saturación de los sitios reactivos disponibles y a limitaciones estéricas dentro de la molécula de almidón, por lo que el mejor tratamiento es a una concentración del 3.0 % de OSA a 2.0 h de reacción. Estos hallazgos obtenidos confirman que la modificación química del almidón de *Dioscorea alata* con OSA es efectiva y presenta un comportamiento dosis-tiempo claramente definido. Este hallazgo se encuentra en concordancia con lo reportado en otros almidones, y abre la posibilidad de utilizar este almidón modificado en aplicaciones alimentarias que requieran mayor estabilidad, capacidad emulsificante y resistencia a procesos de almacenamiento y procesamiento.

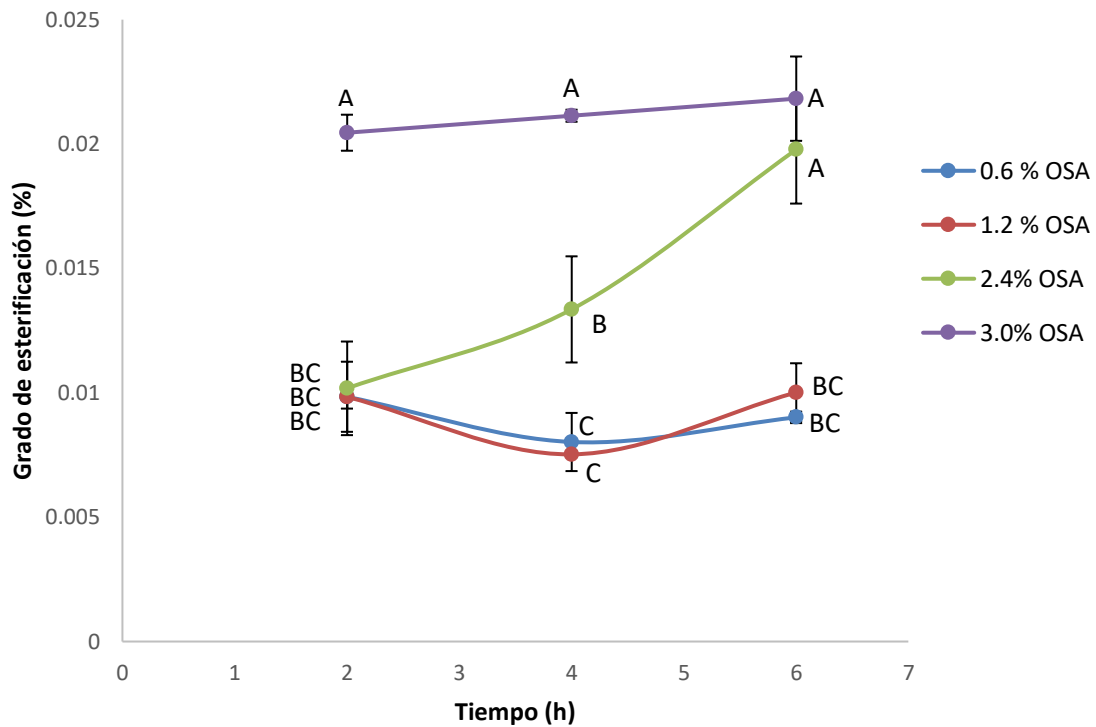


Figura 4 Grado de esterificación de almidón nativo de *D. alata* con Anhídrido Octenil Succínico a diferentes concentraciones y tiempos de reacción

7.3 Capacidad de retención de agua (CRA)

En la Figura 5, se muestra la variación de la CRA en función de la temperatura para diferentes concentraciones de OSA (0.6%, 1.2%, 2.4% y 3.0%). Se encontró un efecto de la temperatura sobre la capacidad de retención de agua por arriba de los 55 °C. Los resultados indican que el almidón nativo requiere una mayor temperatura (65°C) para incrementar significativamente su CRA, mientras que los almidones modificados con OSA, presentaron un cambio de pendiente en la gráfica por arriba de los 55°C. Mientras que a temperaturas inferiores a los 55 °C la CRA se mantuvo sin cambios significativos ($p > 0.05$). Este comportamiento se relaciona con la gelatinización del almidón, donde el calor rompe enlaces de hidrógeno y permite mayor interacción de las cadenas de almidón con el agua. Por lo anterior, podemos asumir que la temperatura y la concentración de OSA influyeron de manera significativa en la capacidad del almidón para retener agua.

La temperatura de 95 °C fue el punto en el que se observaron las diferencias más marcadas en la capacidad de retención de agua (CRA) entre el almidón nativo y los almidones modificados con OSA. Este comportamiento es consistente con el hecho de que, a temperaturas cercanas o superiores a la temperatura de gelatinización, las estructuras granulares se desorganizan y permiten evaluar con mayor sensibilidad los efectos de las modificaciones químicas sobre la hidratación y la capacidad de hinchamiento.

A esta temperatura, el almidón nativo presentó la mayor CRA ($65.95\% \pm 4.35$), valor significativamente superior ($p \leq 0.05$) al de todos los tratamientos modificados. Este resultado coincide con lo reportado en la literatura, donde se ha documentado que la esterificación con Anhídrido Octenil Succínico (OSA) reduce la capacidad de hinchamiento y la afinidad por el agua debido a la introducción de grupos hidrofóbicos en la superficie granular (Shogren et al., 2000; Hoover, 2001). La presencia de estos grupos limita la penetración de agua en la matriz del gránulo y restringe la expansión durante la gelatinización, lo que explica la menor CRA observada en los almidones modificados.

En cuanto a los tratamientos con 0.6%, 1.2% y 3.0% OSA, la ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ellos sugiere que, dentro de este rango, el incremento en el grado de sustitución no genera cambios proporcionales en la capacidad de hidratación. Este comportamiento ha sido descrito previamente; diversos autores señalan que, una vez alcanzado un umbral de sustitución, los grupos OSA tienden a distribuirse superficialmente y su efecto sobre la hidratación se estabiliza (Wang y Wang, 2003; Xie et al., 2014). En otras palabras, pequeñas variaciones en la concentración de OSA no necesariamente se traducen en diferencias funcionales detectables en propiedades dependientes de la interacción entre el agua y el almidón.

El tratamiento con 2.4% OSA mostró la menor CRA a 95 °C, aunque sin diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto a 1.2% y 3.0% OSA. Este resultado puede interpretarse desde dos perspectivas. Primero, podría reflejar variaciones en la eficiencia de la reacción de esterificación, ya que la concentración nominal de OSA no siempre se traduce en un grado de sustitución lineal, dependiendo de

factores como pH, agitación y accesibilidad de los grupos hidroxilo (Liu et al., 2008). Segundo, la disminución en CRA podría deberse a una mayor densidad de grupos hidrofóbicos que restringen aún más la hidratación del gránulo, efecto que ha sido reportado en almidones con grados de sustitución intermedios, donde se observa una reducción marcada en la capacidad de hinchamiento antes de alcanzar un valor constante (Xie et al., 2014). Una mayor CRA es deseable en productos como salsas, sopas instantáneas y alimentos congelados, donde la retención de agua asegura textura estable y evita sinéresis.

La capacidad de retención de agua (CRA) es una propiedad funcional estrechamente relacionada con el comportamiento térmico del almidón, ya que refleja el grado en que los gránulos pueden hidratarse, hincharse y mantener su integridad estructural durante el calentamiento. En los almidones modificados con Anhídrido Octenil Succínico (OSA), la CRA observada a 95 °C, al ser significativamente menor que la del almidón nativo ($p \leq 0.05$), puede interpretarse como un indicador de mayor estabilidad térmica, debido a los cambios estructurales inducidos por la modificación química con OSA.

La esterificación con OSA introduce grupos hidrofóbicos en la superficie del gránulo, lo que reduce su afinidad por el agua y limita la penetración de esta en la matriz interna. Shogren et al., (2000) demostraron que la presencia de grupos octenilsuccinato disminuye la hidratación y restringe el hinchamiento, ya que la hidrofobicidad superficial actúa como barrera frente al ingreso de agua. De manera similar, Hoover (2001) señala que la reducción en la hidratación inicial se traduce en una menor expansión granular durante la gelatinización, lo que preserva la integridad estructural del almidón modificado.

Por lo tanto la menor capacidad de hinchamiento en los almidones modificados incluidos en este estudio tiene implicaciones directas en la estabilidad térmica. Cuando un gránulo se hincha menos, también libera menos amilosa hacia el medio, lo que reduce la pérdida de cohesión interna y la ruptura térmica. Wang y Wang (2003) reportaron que almidones con menor hinchamiento presentan menor lixiviación de amilosa y mayor resistencia a la desintegración durante el calentamiento. Este comportamiento coincide con lo observado en los almidones

modificados con OSA en este trabajo, donde la menor CRA puede reflejar una estructura más rígida y menos susceptible a la gelatinización completa. Además, la modificación con OSA puede favorecer interacciones hidrofóbicas entre cadenas, lo que incrementa la cohesión interna del gránulo y disminuye la movilidad molecular. Liu et al. (2008) explican que estas interacciones contribuyen a una mayor estabilidad térmica, ya que la estructura requiere más energía para desorganizarse. En este sentido, la menor CRA no solo es consecuencia de la hidrofobicidad, sino también un indicador funcional de una estructura granular más resistente al calor. Sin embargo, harían falta estudios complementarios para sustentar mejor esta aseveración, tales como análisis de calorimetría diferencial de barrido.

Como se puede observar en la Figura 5, la relación entre la concentración de OSA y la CRA no siempre es lineal. Xie et al., (2014) describen que, una vez alcanzado cierto grado de sustitución, las propiedades funcionales tienden a estabilizarse, generando un comportamiento tipo meseta (*plateau*). Esto coincide con los resultados obtenidos en los tratamientos con Anhídrido Octenil Succínico en este trabajo, donde diferentes concentraciones de OSA no siempre produjeron diferencias significativas en la CRA, lo que sugiere que la estabilidad térmica alcanzada puede ser similar dentro de ciertos intervalos de modificación. Por esta razón, los valores de CRA encontrados en los almidones modificados con OSA en este trabajo, al ser menores que los valores de CRA en el almidón nativo, pueden interpretarse como evidencia de una mayor estabilidad térmica, derivada de una menor hidratación, un hinchamiento más controlado y una mejor preservación de la estructura granular durante el calentamiento. Esta interpretación es consistente con lo reportado en la literatura y permite comprender de manera más profunda el comportamiento funcional de los almidones modificados frente a procesos térmicos, lo cual es ventajoso en la industria alimentaria.

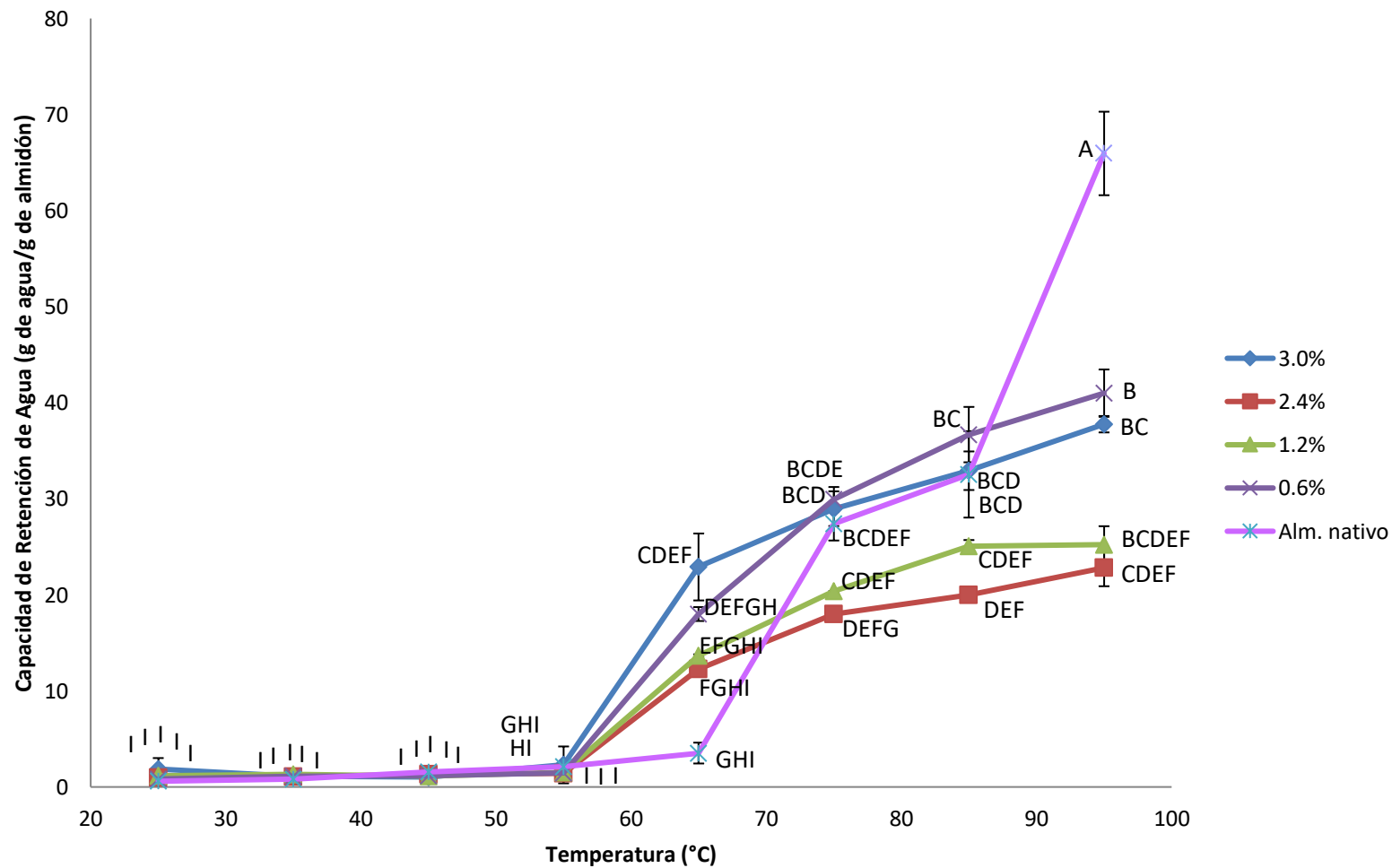


Figura 5 Capacidad de Retención de Agua de almidón nativo de *D. alata* y de los almidones modificados a distintas concentraciones de OSA y distintas temperaturas.

7.4 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La Figura 6 corresponde a los espectros de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del almidón nativo de *D. alata* y del almidón modificado a distintas concentraciones de OSA (1.2%, 2.4% y 3.0%), que permite identificar los cambios estructurales en el almidón tras la modificación química.

En la banda 2920 cm^{-1} que es el estiramiento C–H, corresponde a vibraciones de los grupos metilo y metileno. Su presencia más marcada en los almidones modificados indica la incorporación de cadenas alquílicas provenientes del OSA, lo que confiere carácter hidrofóbico al almidón. Entre 1720 y 1740 cm^{-1} se pueden observar señales que corresponden al estiramiento C=O de ésteres, lo cual es característico de los grupos carbonilo introducidos por la esterificación con OSA. La ausencia de esta señal en el almidón nativo y su aparición en los modificados constituye evidencia directa de la reacción de sustitución. Entre 1560 y 1580 cm^{-1} , se observan señales que indican vibraciones de C–O y C–H asociados a grupos carboxilato, con lo que se confirma la incorporación de grupos succínicos, responsables de incrementar la hidrofobicidad del almidón. Asimismo, se observan cambios en la región de 1000 a 1150 cm^{-1} , asociada a las vibraciones C–O–C del anillo glucosídico, lo cual sugiere alteraciones en la organización molecular del almidón tras la esterificación. El almidón nativo no muestra señales de estos grupos por lo que podemos imaginar el almidón nativo como una “red limpia” de moléculas y al añadir OSA, se le incorporan nuevos grupos químicos que cambian su comportamiento.

Los almidones modificados sí muestran “huellas digitales” claras en el espectro (las bandas nuevas), lo que significa que el OSA realmente se unió a la estructura química del almidón. Esto explica por qué el almidón modificado tiene nuevas propiedades, como menor capacidad de retención de agua y estabilidad térmica, lo cual representa una ventaja frente a procesos industriales.

Algunos estudios en almidón de maíz cacahuacintle muestran que la aparición de la banda en 1740 cm^{-1} es un marcador inequívoco de la esterificación con OSA, confirmando la incorporación de grupos carbonilo (López-Vásquez et al., 2024). También investigaciones previas en *Dioscorea alata* señalan que la modificación química incrementa la solubilidad y la capacidad de absorción de agua, lo cual se relaciona directamente con la presencia de grupos succínicos detectados en FTIR (Pacheco y Techeira, 2009).

El aumento en la intensidad de estas bandas con la concentración de OSA indica una mayor incorporación de grupos octenil succinato en la estructura del almidón, lo que concuerda con lo reportado por Sweedman et al., (2013) y Crossman et al., (2004), quienes señalan que la presencia de dichas señales es una evidencia clara de la modificación exitosa del almidón. Por lo anterior, los resultados de FTIR presentados en este trabajo, confirman la efectividad del proceso de modificación química y respaldan los cambios observados en las propiedades funcionales del almidón, como el cambio en la capacidad de retención de agua.

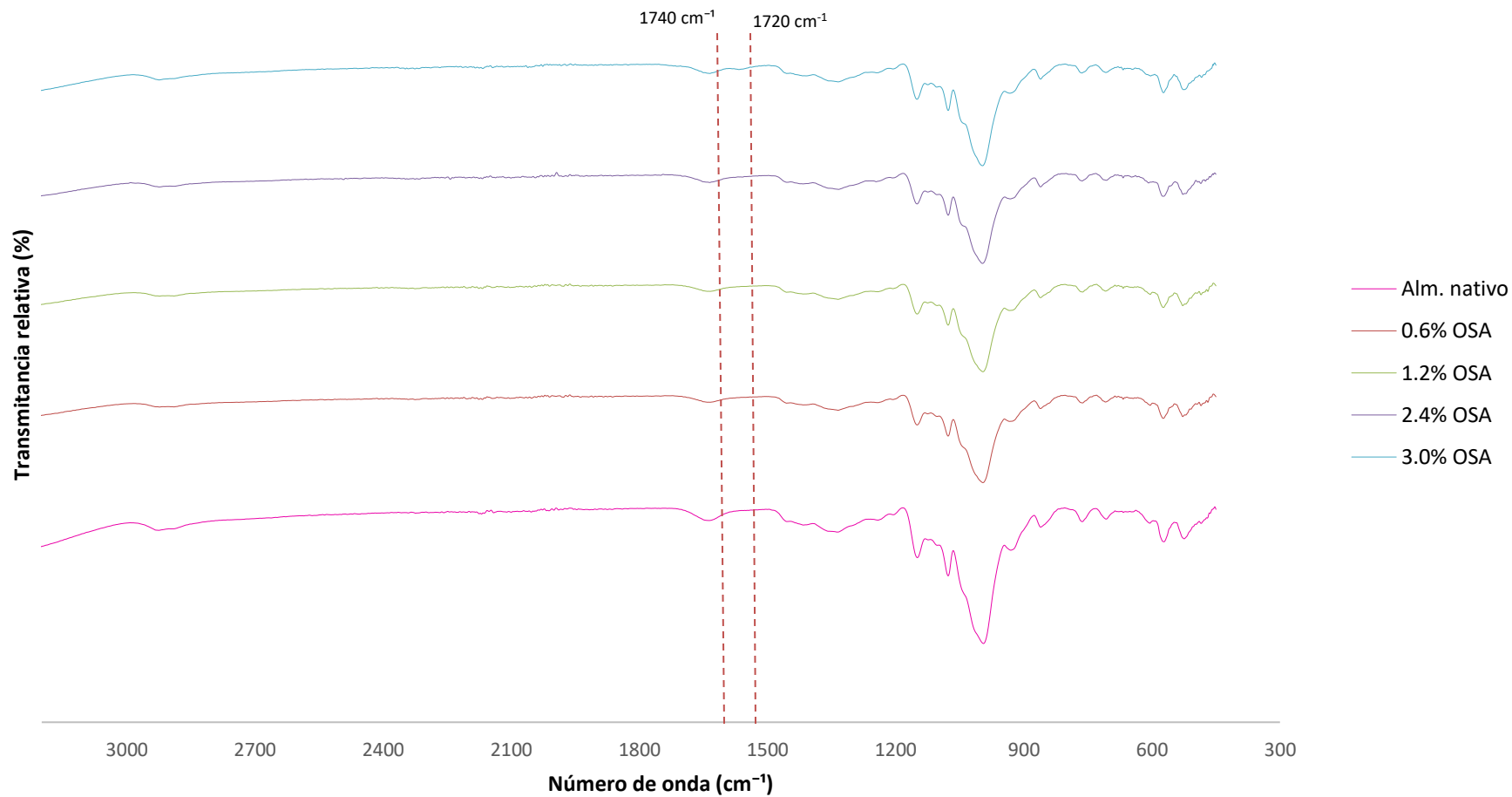


Figura 6 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier de almidón nativo de D.alata y modificado a distintas concentraciones.

7.5 Difracción de Rayos X (XRD)

La figura 7 muestra el difractograma de Rayos X (XRD) del almidón nativo y modificado de *Dioscorea alata* a diferentes concentraciones de OSA (0.6%, 1.2%, 2.4% y 3.0%). Cada tratamiento fue evaluado para determinar los cambios estructurales en la cristalinidad del almidón. La comparación entre el almidón nativo y los modificados mostraron variaciones en la intensidad y definición de los picos característicos, lo que refleja alteraciones en la organización molecular de las regiones cristalinas y amorfas.

El almidón nativo presentó picos característicos alrededor de $2\theta \approx 15^\circ$, 17° , 18° y 23° . Este patrón es típico de una estructura cristalina tipo A, común en almidones de tubérculos y cereales, dependiendo de la especie, que no han sido modificados químicamente y tienen su organización granular intacta. Los picos definidos se asocian con regiones cristalinas bien desarrolladas, que son propias de la organización en dobles hélices de amilopectina (Subroto et al., 2023). Los almidones modificados con OSA a las concentraciones de 0.6%, 1.2%, 2.4% y 3.0% mantienen las posiciones de los picos principales, lo que indica que el tipo de polimorfismo cristalino no cambió tras la modificación. También se observó que hay una disminución progresiva en la intensidad de los picos conforme aumenta la concentración de OSA y se logró apreciar un ligero ensanchamiento de los picos, lo que sugiere una reducción en el grado de orden estructural. Este comportamiento sugiere una disrupción parcial de las regiones cristalinas, debido a la incorporación de grupos succínicos que interfieren con la organización molecular. A mayor concentración de OSA 2.4% y 3.0%, la reducción en la intensidad de los picos es más evidente, reflejando una mayor fase amorfa y menor ordenamiento a largo alcance, lo que confirma que el grado de modificación química está directamente relacionado con la pérdida de cristalinidad, haciendo que el almidón sea más funcional en aplicaciones alimentarias.

Por lo tanto, la difracción de rayos X evidenció que la modificación con OSA reduce la cristalinidad del almidón de *Dioscorea alata*, reflejada en la disminución

de la intensidad de los picos característicos del patrón tipo A. Este comportamiento es consistente con lo reportado para almidones sometidos a esterificación, donde la incorporación de grupos sustituyentes interfiere con el empaquetamiento ordenado de las dobles hélices y aumenta la fracción amorfa (Hoover, 2001; Liu et al., 2019).

No obstante, la disminución de cristalinidad no se traduce necesariamente en una mayor capacidad de retención de agua durante el calentamiento, ya que la hidratación del almidón modificado depende no solo del grado de desorden estructural, sino también de la naturaleza química de los grupos introducidos. En el caso del almidón OSA, los grupos octenilsuccinato aportan carácter anfifílico, generando regiones hidrofóbicas que limitan la interacción con el agua incluso cuando la estructura granular es más amorfa. Estudios previos han demostrado que los almidones OSA pueden presentar menor capacidad de hidratación y menor retención de agua bajo calentamiento debido a la presencia de dominios hidrofóbicos que restringen la penetración y retención de agua en la matriz gelatinizada (Shogren, 1996; Wang y Wang, 2001).

La reducción de cristalinidad sí favorece procesos como gelatinización y accesibilidad molecular, pero estos efectos se manifiestan principalmente en la facilidad de hinchamiento inicial y en la ruptura de la estructura granular, no necesariamente en la capacidad de retener agua una vez que el sistema ha sido calentado. Durante el calentamiento, los grupos hidrofóbicos del OSA pueden reorganizarse y promover interacciones intramoleculares e intermoleculares que reducen la capacidad del gel para mantener agua atrapada, lo que explica la menor CRA observada en los almidones modificados en la sección 7.3.

Algunas investigaciones sobre almidones modificados con OSA coinciden en que este tipo de modificación produce una disminución en la cristalinidad relativa sin cambiar el patrón cristalino original, debido a que la esterificación ocurre principalmente en la superficie del gránulo y en regiones amorfas (Bao et al., 2003; Zhang et al., 2014). Asimismo, se ha documentado que el aumento en el

grado de sustitución provoca una mayor alteración estructural, reflejada en la reducción de la intensidad de los picos de difracción (Singh et al., 2007).

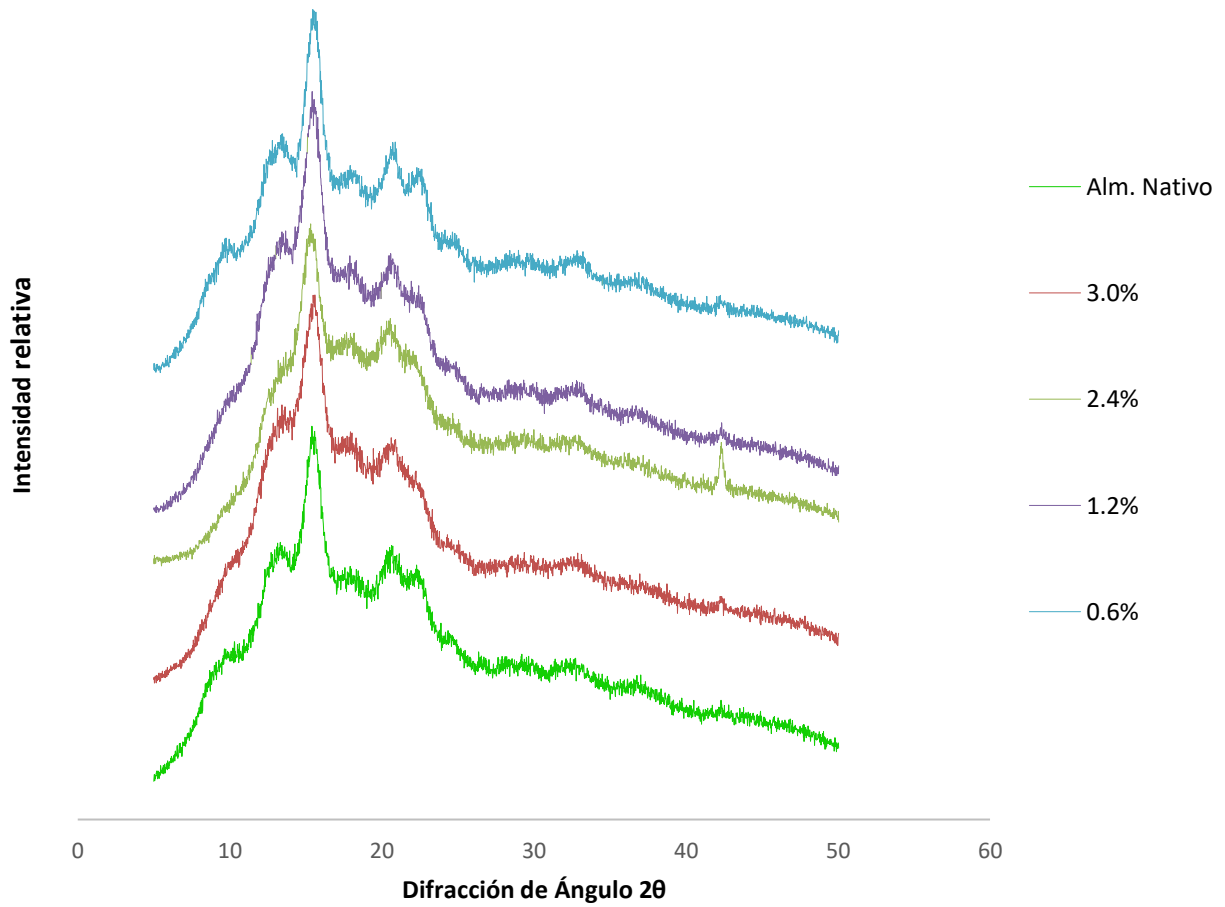


Figura 7 Difracción de Rayos X (XRD de almidón nativo de *D. alata* y modificado a distintas concentraciones

8. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la modificación química del almidón nativo de *Dioscorea alata* mediante Anhídrido Octenil Succínico (OSA) fue efectiva y dependió de la concentración del agente modificante y del tiempo de reacción. A concentraciones elevadas de OSA, particularmente al 3.0 %, se logró un mayor Grado de esterificación, lo que permitió identificar al tratamiento de 3.0 % de OSA y 2 h de reacción como el tratamiento más adecuado para su esterificación. La modificación estructural del almidón se reflejó en una disminución significativa de la Capacidad de Retención de Agua, atribuible a la incorporación de grupos funcionales hidrofóbicos y a la alteración del ordenamiento molecular del almidón de *Dioscorea alata*. Los análisis de FTIR confirmaron la formación de enlaces éster característicos del almidón modificado con OSA, mientras que la Difracción de Rayos X evidenció una disminución de la cristalinidad conforme aumentó la concentración del agente modificante.

9. REFERENCIAS

1. Adewale, P., Yancheshmenh, M. y Lam, E. (2022). Starch modification for non-food, industrial applications: Market intelligence and critical review. Elsevier, 291, 119590. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>
2. Ahmad, A. y Ayub, H. (2022). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) technique for food analysis and authentication. *Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables* (pp. 103–142). https://doi.org/10.1007/978-981-19-6159-3_6
3. Alcázar, C. y Meireles, A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology (Campinas)*, 35(2), 215–236. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6749>
4. Altuna, L. y Herrera, M. (2018). Síntesis y caracterización de almidones modificados con anhídrido octenil succínico para aplicaciones alimentarias. *Hidrocoloides Alimentarios*, 80. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X17318167>
5. Aung, T., Myint, P., Win, C. y Myint, Y. (2020). Study on nutritional quality and antimicrobial, antioxidant and anti-proliferative activities of *Dioscorea alata* L. (Myauk U). *International Journal of Current Research in Biosciences and Plant Biology*, 18(1), 1–12.
6. Awokoya, O. (2022). Effect of OSA modification on the physicochemical and functional properties of starches: A comprehensive review. *Polymers*, 14(12), 2478. <https://doi.org/10.3390/polym14122478>
7. Baah, F., Asiedu, R. y Oduro, I. (2009). Nutritional and biochemical composition of *D. alata* (*Dioscorea spp*) tubers. *Journal Of Food, Agriculture & Enviroment*,

<https://www.researchgate.net/publication/233792330> Nutritional and biochemical composition of *D alata* Dioscorea spp tubers

8. Bao, J., Xing, J., Phillips, D. L. y Corke, H. (2003). Physical properties of octenyl succinic anhydride modified rice, wheat, and potato starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(8), 2283–2287. DOI:10.1021/jf020371u
9. Beech, D., Beech, J., Gould, J. y Hill, S. (2022). Effect of amylose/amylopectin ratio and extent of processing on the physical properties of expanded maize starches. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 2298–2309. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15581>
10. Bernal, L. y Martínez, E. (2008). Una nueva visión de la degradación del almidón. *Revista del Centro de Investigación*, 7. <https://www.redalyc.org/pdf/342/34202506.pdf>
11. Borges, M., Malaurie, B., Meneses, S., Gómez, R., Lartaud, M. y Verdeil, J. (2016). Anatomía comparada de plantas de *Dioscorea alata*. clon Caraqueño cultivadas en tres ambientes de crecimiento in vitro. *Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 77–86. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.61528>
12. Codex Alimentarius Commission. (2019). *General Standard for Food Additives (CODEX STAN 192-1995)*. Rome: FAO/WHO. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>
13. Compart, J., Singh, A., Fettke, J. y Apriyanto, A. (2023). Customizing Starch Properties: A Review of Starch Modifications and Their Applications. *Polymers*, 15(16), 3491. <https://doi.org/10.3390/polym15163491>.

14. Contreras, I., Perilla, J. y Algecira, N. (2008). Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *Ingeniería e Investigación*, 28(3),: 0120-5609
15. Cortés, E. (2015). Caracterización de los almidones de ñame (*Dioscorea alata*), ñampí (*Colocasia esculenta*) y tiquisque (*Xanthosoma sagittifolium*) y evaluación de su uso potencial como materia prima para la producción de una pasta alimenticia a base de harina de arroz con alto contenido de almidón resistente. Universidad de Costa Rica, 3–12
16. Crossman, S. (2004). Octenyl succinic anhydride (OSA) modified starches: Structure, functionality and applications. *Food Hydrocolloids*, 18(5), 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2003.12.001>
17. Cozzolino, D. (2015). Infrared Spectroscopy as a Versatile Analytical Tool for the Quantitative Determination of Antioxidants in Agricultural Products, Foods and Plants. *Antioxidants*, 4(3), 482–497. <https://doi.org/10.3390/antiox4030482>
18. Cullity, D. y Stock, S. (2014). *Elements of X-Ray Diffraction*. Pearson New International Edition, 1-292-04054-8
19. Darkwa, K., Olasanmi, B., Asiedu, R. y Asfaw, A. (2019). Review of empirical and emerging breeding methods and tools for yam (*Dioscorea spp.*) improvement: Status and prospects. *Plant Breeding*, 139(3), 474-497. <https://doi.org/10.1111/pbr.12783>
20. Dey, P., Roy, S., Sarkar, P. y Chaudhuri, K. (2016). Evaluation of anti-inflammatory activity and standardisation of hydro-methanol extract of underground tuber of *Dioscorea alata*. *Pharmaceutical biology*, 54(8), 1474–1482. <https://doi.org/10.3109/13880209.2015.1104702>

21. Draus, C. (2024). Cómo funcionan las máquinas de inspección de alimentos por rayos X. Eagle Product Inspection. <https://www.eaglepi.com/es/blog/how-x-ray-food-inspection-machines-work/>
22. Dutta, P. y Verma. (2023). Effect of different modifications on the excipient properties of potato starch. International Journal of Creative Research Thoughts, 11, : 2320-2882
23. Estrada-Fernández, A. G., Dorantes-Bautista, G., Román-Guerrero, A., Campos-Montiel, R. G., Hernández-Uribe, J. P. y Jiménez-Alvarado, R. (2021). Modification of Oxalis tuberosa starch with OSA, characterization and application in food-grade Pickering emulsions. Journal of Food Science and Technology, 58, 2896-2905
24. Eyinla, T., Sanusi, R. y Maziya, B. (2022). Evaluation of in vitro and in vivo glycemic Index of common staples made from varieties of White Yam (*Dioscorea rotundata*). Front. Nutr. 9:983212.10.3389/fnut.2022.983212
25. Fonseca, H., Andrade, M. y Menegalli, C. (2018). Effect of acid hydrolysis and OSA esterification of waxy cassava starch on emulsifying properties in Pickering-type emulsions. LWT - Food Science and Technology, 91, 258–264. [10.1016/j.lwt.2018.01.057](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.057)
26. Galkowska, D., Kapuśniak, K. y Juszczak, L. (2023). Chemically modified starches as food additives. *Molecules*, 28(22), 7543. <https://doi.org/10.3390/molecules28227543>
27. González, M. (2012). El ñame (*Dioscorea spp.*): Características, usos y valor medicinal. Cultivos Tropicales, 33(4), 5–15
28. Grupo Filogenético de Angiospermas III (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants:

- APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society* (161): 105-121.
<https://doi/10.1111/j.1095-8339.2009.00996.x/abstract>
29. Hata, Y., Reguero, M., García, A., Buitrago, G. y Álvarez, A. (2003). Evaluación del contenido de saponinas en variedades nativas de ñame (*Dioscorea spp.*), provenientes de la colección de la Universidad de Córdoba. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 32 (2), 149-157.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rccquifa/article/view/1671/2330>
30. Hernández-Urbe, J. P., Meza-Nieto, M., Palma-Rodríguez, H. M., Navarro-Cortez, R. O., Guzmán-Ortiz, F. A., Bello-Pérez, L. A. y Vargas-Torres, A. (2020). Physicochemical, Morphological, and Molecular Properties of Starch Isolated from *Dioscorea* and *Oxalis* Tubers from Hidalgo State, Mexico. *StarchStarke*, 72(11-12). <https://doi.org/10.1002/star.202000074>
<https://www.scielo.org.ar/pdf/lilo/v54n1/v54n1a01.pdf>
31. Hernández, M. y Ramos, J. (2024). técnicas de formación de almidón resistente para la industria alimentaria: una revisión. *Revista IIA*, 1(1), 45–56
32. Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253–267. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00260-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00260-5)
33. Hou, W., Chen, H., Chen, E., Chang, C., Lin, Y. y Chang, W. H. (2022). Antioxidant activities of yam (*Dioscorea alata* L.) extract. *The Korean Journal of Food And Nutrition*, 35(4), 1225–4339,
<https://doi.org/10.9799/ksfan.2022.35.4.268>
34. Hu, H., Liu, W., Shi, J., Huang, Z., Zhang, Y., Huang, A., Yang, M., Qin, X. y Shen, F. (2015). Structure and functional properties of octenyl succinic anhydride modified starch prepared by a non-conventional technology. *Starch - Stärke*, 68(1-2), 151-159. <https://doi.org/10.1002/star.201500195>

35. Jiang, S., Cen, J., Zhou, Y., Wang, Y., Wu, D., Wang, Z., Sun, J. y Shu, X. (2023). Physicochemical characterizations of five *Dioscorea alata* L. starches from China. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 124225. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124225>
36. Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R. y Karim, A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.016>
37. Kaviraj, M., Kirti, K., Sheelpa, H., Aroma, L., Ilarani, P. y Sanjeet K. (2022). Food and medicinal values of *Dioscorea alata* L. En Yam (55-62). APRF, Odisha, India. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7088570>
38. Keshavarzi, Z., Barzegari, S., Faizi, M., Zolghadri, Y. y Shirazi, F. (2019). Comparison of transmission FTIR and ATR spectra for discrimination between beef and chicken meat and quantification of chicken in beef meat mixture using ATR-FTIR combined with chemometrics. *Journal of Food Science and Technology*, 57(4), 1430–1438, [10.1007/s13197-019-04178-7](https://doi.org/10.1007/s13197-019-04178-7)
39. Kim, K.-N., Kang, M.-S., Joo, N.-S., Lee, H.-R., Jung, S., Ju, S., Lee, Y.-J., Lee, K., Jung, S., & Lee, J. (2025). Effects of resistant starch on metabolic markers and gut microbiota in women with metabolic syndrome risk factors: A randomized, double-blind, pilot study. *Nutrients*, 17(23), 3652. <https://doi.org/10.3390/nu17233652>
40. Kohn, R., Fontoura, M., Kempka, P., Demiate, M., Kubota, H. y Prestes, C. (2015). Assessment of different methods for determining the capacity of water absorption of ingredients and additives used in the meat industry. *International Food Research Journal*, 22(1), 356–362

41. Lawal, O., Lapasin, R., Bellich, B., Olayiwola, O., Cesaro, A., Yoshimura, M. y Nishinari, K. (2011). Rheology and functional properties of starches isolated from five improved rice varieties from West Africa. *Food Hydrocolloids*, 25(7), 1785–1792. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.010>
42. Lebot, V., Lawac, F., & Legendre, L. (2023). The greater yam (*Dioscorea alata* L.): A review of its phytochemical content and potential for processed products and biofortification. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104987. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104987>
43. Lebot, V., Malapa, R. y Michellon, R. (2019). Physicochemical characterization of yam (*Dioscorea alata* L.) tubers from Vanuatu. *Food Chemistry*, 283, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.049>
44. Lee, H., Jeong, G., Lim, S. y Lee, C. (2024). Impact of Esterification with Octenyl Succinic Anhydride on the Structural Characteristics and Glucose Response in Mice of Wheat Starch. *Foods*, 13(9), 1395. <https://doi.org/10.3390/foods13091395>
45. León, G. y Méndez, D. (2020). Modificación química de almidones Resumen abstract Introducción mediante reacciones de esterificación y supotencial uso en la industria cosmética. *open journal systems*. https://www.revistaavft.com/images/revistas/2020/avft_5_2020/17_modificacion.pdf
46. León, G., León, D., Monroy, M., De la Espriella, S. y Barros, A. (2020). Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su

potencial uso en la industria cosmética. Zenodo (CERN European Organization For Nuclear Research). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4263365>

47. Liang, S., Zeng, Y., Wang, L., Wu, J., Cao, M., Chen, X. y Jiang, Q. (2026). Cultivated and wild yam (*Dioscorea alata* L.) starches: Physicochemical properties, in vitro digestibility, and related correlations. *International Journal of Food Science and Technology*, 61(1). <https://doi.org/10.1093/ijfood/vvag006>
48. Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L. y Li, L. (2008). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science*, 34(12), 1348–1368. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.07.001>
49. López-Vázquez, D., Hernández-Rodríguez, L., LobatoCalleros, C. y Aguirre-Mandujano E. (2024). Effect of OSA modification of cacahuacintle corn starch on its physicochemical properties, digestibility and stability. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 16(2) 21–38. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2024.06.020>
50. Luo, X., Cheng, B., Zgang, W. y Zeng, X.(2021). Structural and functional characteristics of Japonica rice starches with different amylose contents. *Journal of Food*, 19(1), 532-540, [10.1080/19476337.2021.1927194](https://doi.org/10.1080/19476337.2021.1927194)
51. Manu, F., Dixon, B., Asiedu, R. y Oduro, I. (2009). Nutritional and biochemical composition of *Dioscorea alata* (*Dioscorea* spp.) tubers. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(2), 373–378
52. Martínez, E. (2025). ¿Qué es el FTIR?. *ATRIA Innovation*. <https://atriainnovation.com/blog/que-es-el-ftir/>
53. Matuda, E. (1953). Las *Dioscoreas* de México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 24(1), 123–146
54. Mawoneke, K., Kwiri, R. y Ndemera, M. (2024). A concise review of yam (*Dioscorea* spp.) starch: Extraction, chemical composition, physicochemical

- properties and its potential food applications. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1), 2447900. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2447900>
55. McVaugh, R. (1989). Bromeliaceae to Dioscoreaceae. Editorial W.R. Anderson, Flora Novo-Galiciana, the Univ. Michigan Herbarium. 15, 355-388. <https://doi.org/10.2307/2807171>
56. Mendoza-Crespo, H. y Ortiz-Velásquez, M. (2020). Importancia y determinantes de la asociación productiva agrícola: el cultivo de ñame en el caribe colombiano. *Sociedad y economía*. (41), 88-108. <https://doi.org/10.25100/sye.v0i41.8932>
57. Miao, M., Li, R., Jiang, B., Cui, S. W. y Jin, Z. (2014). Structure and physicochemical properties of octenyl succinic esters of sugary maize soluble starch and waxy maize starch. *Food Chemistry*, 151, 154–160. 10.1016/j.foodchem.2013.11.043.
58. Mondo, J., Agre, P., Edemodu, A., Adebola, P., Asiedu, R., Akoroda, M. y Asfaw, A. (2020). Floral biology and pollination efficiency in yam (*Dioscorea spp.*). *Agriculture*, 10(11), 560. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110560>
59. Moriya, C., Hosoya, T., Agawa, S., Sugiyama, Y., Kozone, I., Shin-ya, K., Terahara, N. y Kumazawa, S. (2015). New acylated anthocyanins from purple yam and their antioxidant activity. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 79(9), 1484–1492. <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1027652>
60. Obidiegwu, E., Lyons, J. y Chilaka, C. (2020). The *Dioscorea* Genus (Yam)—An appraisal of nutritional and therapeutic potentials. *Foods*, 9(9), 1304. <https://doi.org/10.3390/foods9091304>

61. Olawoye, B., Popoola, O., Oluwajuyitan, D., Adetola, B., Adeloye, A., y Ayodele, A. (2023). Octenyl succinic anhydride modification of starch. *Advances in Modifications, Technologies and Applications* (pp. 127–149). [10.1007/978-3-031-35843-2_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35843-2_6)
62. Pacheco, E. y Techeira, N. (2009). Propiedades químicas y funcionales del almidón nativo y modificado de ñame (*Dioscorea alata*). *Interciencia*, 34, 0378-1844. <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/280-c-TECHEIRA-6.pdf>
63. Pérez, S. y Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch - Starke*, 62(8), 389–420. <https://doi.org/10.1002/star.201000013>
64. Piedra, B., López, C. del J., Pacheco, A. y Vanoye, M. (2024). El ñame (*Dioscorea alata*) dentro de la gastronomía campechana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 7651-7657. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14173
65. Ratnayake, W. y Jackson, S. (2009). Starch gelatinization. *Advances in Food and Nutrition Research*, 55, 221–268. 10.1016/S1043-4526(08)00405-1
66. Restrepo, M., Ortiz, S. y Rodríguez, R. (2022). Rendimiento de almidón nativo en dos especies de ñame *Dioscorea sp.* *ECBTI*, 4. https://publicaciones.unad.edu.co/index.php/wpecbti/article/view/6723?utm_source=chatgpt.com
67. Ribeiro, A., Chaves, E., Godim, C., Alves, S., Resende, E., Mendes, G., Soares, M. y Caliari, M. (2021). Isolation and characterization of yam (*Dioscorea alata*) starch from Brazil. *Elsevier*, 149,111843. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111843>

68. Rodríguez, W. (2000). Botánica, domesticación y fisiología del cultivo de ñame (*Dioscorea alata*). *Agronomía Mesoamericana*, 11(2), 133–152. Universidad de Costa Rica. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43711221>
69. Salcedo, J., García, C. y Salcedo, D. (2018). Propiedades funcionales de almidones de ñame (*Dioscorea alata*). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 16(2), 1170.
70. Salmón, L. (2023). Estudios de las propiedades del almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) y caracterización por FITR ATR. *Investigación Aplicada E Innovación*, 17. <https://revista.tecsup.edu.pe/index.php/lmasi/article/view/62/62>
71. Santacruz-Ruvalcaba., F., Casas-Salas, J., Pérez, R., Guzmán, E., Morán, M., Hernández, C. y De los Santos, LI. (2005). Conservación, manejo y aprovechamiento del camote de cerro (*Dioscorea spp.*) en el estado de Jalisco, México. *Avances de la Investigación Científica en el CUCBA*. XVI. 179-183.
72. Sarka, E., Sinica, A., Smrckova, P. y Slukova, M. (2023). Non-traditional starches, their properties, and applications. *Foods*, 12(20), 3794. <https://doi.org/10.3390/foods12203794>
73. Shaajeela, P. S., Mohan, V. R., Louis, L. y Tresina, P. (2011). Evaluación del valor nutricional y factores antinutricionales de *Dioscorea spp.* silvestres. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 723–730. 1870-0462.
74. Shogren, R. L., Viswanathan, A., Felker, F. C. y Gross, R. A. (2000). Distribution of octenyl succinate groups in modified waxy maize starch. *Starch/Stärke*, 52(6–7), 230–235. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200007\)52:6/7 \(doi.org in Bing\)<230::AID-STAR230>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200007)52:6/7 (doi.org in Bing)<230::AID-STAR230>3.0.CO;2-3)

75. Shogren, R. (2003). Rapid preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction. *Carbohydrate Polymers*, 52(3), 319–326. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00305-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00305-3)
76. Singh, J., Kaur, L. y McCarthy, J. (2007). Factors influencing the physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications. *Food Hydrocolloids*, 21(1), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>
77. Soto, L., González, J., Nicanor, A., Cruz, L. y Fernández, J., (2014). Chemical Characterization and Nutritional Evaluation of Mountain's yam (*Dioscorea remotiflora* Kunth). *Tubers*, 5(2), 153-160. <http://doi:10.15515/abr.0976-4585.5.2.153160>
78. Subroto, E., Cahyana, Y., Indiarso, R. y Rahmah, T. (2023). Modification of Starches and Flours by Acetylation and Its Dual Modifications: A Review of Impact on Physicochemical Properties and Their Applications. *Polymers*, 15(14), 2990. <https://doi.org/10.3390/polym15142990>
79. Sweedman, M., Tizzotti, M., Schäfer, C. y Gilbert, R. (2013). Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 905–920.
80. Tanimola, R., Otegbayo, O. y Akinoso, R. (2022). Physicochemical properties of yam starches from fifty-five lines of *Dioscorea* species. *Food Research*, 6(3), 49–61. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.6\(3\).224](https://doi.org/10.26656/fr.2017.6(3).224)
81. Téllez, O. y Torres, S. (2021). *Dioscorea L.* un género multifacético. *Ciencias*, 26, 28-29. <https://www.revistacienciasunam.com/es/174-revistas/revista-ciencias-26/1601-dioscorea-l,-un-g%C3%A9nero-multifac%C3%A9tico.html>

82. Téllez, V., Y Schubert. B. (1987). Una nueva especie del género *Dioscorea* (*Dioscoreaceae*) del Estado de Querétaro, México. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 74:539–542. <http://doi:10.2307/2399321>
83. Tester, R., Karkalas, J. y Qi, X. (2004). Starch composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*. 39(2), 151-165 <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>
84. Torres, M., Roselis, C. y Aguirre, A. (2015). Obtención y caracterización estructural y funcional de almidón acetilado de malanga (*Colocasia esculenta* Schott). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342015000400019&script=sci_arttext&utm_source=chatgpt.com
85. Uthayakumaran, T., Pushparaja, V., Nadarajah, K., & Vasantharuba, S. (2025). Investigation of drying kinetics, nutrient profile, physicochemical and functional properties of purple yam (*Dioscorea alata*) under different drying conditions. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19, 210–226. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02963-3>
86. Vázquez, B., Del Jesús, C., Del Ángel, A. y Eligio, M. (2024). El ñame (*Dioscorea alata*) dentro de la gastronomía campechana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 8(5), 7651-7657 https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14173
87. Vega, M. (2012). El Ñame (*Dioscorea spp.*) Características, usos y valor medicinal. Aspectos de importancia en el desarrollo de su cultivo. *Cultivos Tropicales*, 33(4), 5-15. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v33n4/ctr01412.pdf>
88. Velásquez, F. (2018). obtención y aplicación de almidones modificados por esterificación (osa) a partir de almidones nativos provenientes de tubérculos andinos. universidad nacional agraria.

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3eb698c5-a4b7-41ad-9334-ec4203afb321/content>

89. Velázquez, J., Durán, N., Ruiz, J. y Gallegos, A. (2022). Distribución geográfica y usos de especies del género *Dioscorea*. Researchgate. 10(19):141-150. [10.32870/ecucba.vi19.273](https://doi.org/10.32870/ecucba.vi19.273)
90. Villarroel, P. y Gómez, C. (2018). Almidón resistente: características tecnológicas e intereses fisiológicos. Revista Chilena de Nutrición, 45. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182018000400271#:~:text=El%20almid%C3%B3n%20es%20la%20mayor,d e%20semillas%20legumbres%20y%20tub%C3%A9rculos.
91. Vishnu, R., Jyothi, N., Sheela, N. y Sreekumar, J. (2023). Identification of anthocyanins in a purple yam (*Dioscorea alata*) accession and their in vitro antiproliferative activity. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 32(3), 467–477, <https://doi.org/10.1007/s13562-023-00828-2>
92. Wang, P., Xu, W., Kong, D. y Zhou, Z. (2025). Transcriptomic profiling of *Dioscorea alata* roots highlights starch and sucrose metabolism pathways. *Plant Molecular Biology Reporter*, 43, 2500–2515. <https://doi.org/10.1007/s11105-025-01611-4>
93. Wang, Y., Lu, S., Li, H., Lu, Y., Sun, Q., y Zhang, M. (2024). Unraveling the molecular basis of color variation in *Dioscorea alata* tubers: Integrated transcriptome and metabolomics analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(4), 2057. <https://doi.org/10.3390/ijms25042057>
94. Wang, Y. J. y Wang, L. (2003). Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite.

Carbohydrate Polymers, 52(3), 207–217. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00271-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00271-3) (doi.org in Bing)

95. Wu, M., Wang, J., Hu, J., Li, Z., Liu, R., Liu, Y. y Chen, W. (2019). Effect of typical starch on the rheological properties and NMR characterization of myofibrillar protein gel. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 258–267. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10033>
96. Xie, F., Yu, L., Su, B., Liu, P., Wang, J., Liu, H., & Chen, L. (2014). Rheological properties of starches with different amylose/amylopectin ratios. *Journal of Cereal Science*, 59(1), 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.10.002>
97. Zhang, W., Cheng, B., Li, J., Shu, Z., Wang, P. y Zeng, X. (2021). Structure and Properties of Octenyl Succinic Anhydride-Modified High-Amylose Japonica Rice Starches. *Polymers*, 13(8), 1325. <https://doi.org/10.3390/polym13081325>
98. Zhang. J., Tao, L., Yang, S., Li, Y., Wu, Q., Song, S. y Lei Y. (2024). Water absorption behavior of starch: A review of its determination methods, influencing factors, directional modification, and food applications, 144. 104321. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224423004363#:~:text=Fondo,almid%C3%B3n%20en%20la%20industria%20alimentaria>.