



EFFECTO DEL AGUA ACTIVADA POR PLASMA COMBINADA CON TRATAMIENTO
POR MICROONDAS EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES, TÉRMICAS,
FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE ALMIDÓN DE MAÍZ

BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL
(TESIS)

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:
SAMARA ACOSTA LÓPEZ

ASESOR:
MTRA. LILIA BAUTISTA CANO

SINODALES:
MTRA. ROSA SILVA BADILLO
MTRO. JAIME BARRERA RODRIGUEZ

Pachuca de Soto, Hgo. ABRIL 2026

46 páginas





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Pachuca
Depto. de Ing. Química y Bioquímica

Pachuca de Soto, Hgo., 25/Marzo/2026
Oficio No. DIQyB/027/2026

Asunto: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

C. SAMARA ACOSTA LÓPEZ
PRESENTE

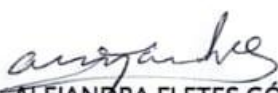
Con el presente me permito informarle que el tema EFECTO DEL AGUA ACTIVADA POR PLASMA COMBINADA CON TRATAMIENTO POR MICROONDAS EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES, TÉRMICAS, FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE ALMIDÓN DE MAÍZ ha sido ACEPTADO para ser presentado por la opción (TESIS) contemplada en la normatividad vigente para tal efecto.

Por lo anterior se le ha designado como asesora a la MTRA. LILIA BAUTISTA CANO como comisión revisora al MTRA. ROSA SILVA BADILLO y MTRO. JAIME BARRERA RODRIGUEZ. Una vez hecha la revisión final se liberará por dicho comité para su impresión y proceder a sustentar al ACTO DE RECEPCIÓN PROFESIONAL.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"


DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFE DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p. archivo
AFG/bfa



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta

C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399 e-mail:

ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Pachuca
Depto. de Ing. Química y Bioquímica

Pachuca de Soto, Hidalgo **29/Abril/2026**

No. de Oficio: DIQ/027/2026

Asunto: Liberación para el Acto de Recepción Profesional

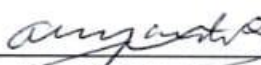
C. SAMARA ACOSTA LÓPEZ, No. de Control: 18011826
Egresada del Programa Educativo de Ingeniería Química y Bioquímica
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberada para el Acto de recepción profesional:

Nombre del Proyecto:	EFFECTO DEL AGUA ACTIVADA POR PLASMA COMBINADA CON TRATAMIENTO POR MICROONDAS EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES, TÉRMICAS, FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE ALMIDÓN DE MAÍZ
Producto/Tema:	(TESIS)

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®


DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p. Expediente.

ITPAC-AC-PO-008-06



2026
año de
Margarita Maza



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta
C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399 e-mail:
ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx

AGRADECIMIENTOS TÉCNICOS

Al Tecnológico Nacional de México, en especial al Instituto Tecnológico de Pachuca la carrera de Ingeniería Química.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada y a su directora Dra. Julieta Torres González además al Dr. Ernesto Hernández Hernández, por permitirme realizar este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo.

A mis asesores la Dra. Pamela Celeste Flores Silva y el Dr. Israel Sifuentes Nieves por el apoyo brindado para poder realizar este trabajo de tesis.

Al equipo de LANIAUTO al Dr. Pablo Gonzales Morones, Dr. José Francisco Hernández Gamez, Dra. Zureima García Hernández, Dr. Alejandro Garza Santibañes, y al Mtro. André Mayki Olivos Ramírez, por todo el apoyo brindado durante la elaboración de esta tesis.

Dr. Jesús Francisco Lara Sánchez por su apoyo y por facilitar el material necesario para la realización de la parte experimental de la presente tesis.

A la I.Q. Guadalupe Méndez Padilla y a la M. en C. Myrna Salinas Hernández por su apoyo en la realización de los análisis TGA y DSC.

A la Dra. Julieta Sánchez Salazar por su apoyo en la capacitación del uso del equipo de espectroscopía infrarroja.

A la I.Q. Myriam Lozano Estrada y Jesús Ángel Cepeda garza por su apoyo en la realización del análisis SEM

Al Ing. Jesús Gilberto Rodríguez Velázquez por el apoyo

A mi tutora y asesora la Mtra. Lilia Bautista Cano por siempre estar presente en todo el proceso de mi carrera, por la orientación en esta tesis las enseñanzas al transcurso de mi estancia dentro del Instituto Tecnológico de Pachuca.

A los docentes Mtro. Cesar Ricardo Vargas, Dra. Alejandra Fletes, Mtro. Jaime Barrera, Mtra Fabiola Velazco, porque gracias a ellos continúe en la carrera, por lo ánimos y el gusto por ella.

Sobre todo, en memoria a Ing. Pérez Campos, fue un pilar importante para que yo pudiera estar dentro del Instituto, sin el nada de esto sería posible.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Los triunfos y todo lo que soy se lo debo a los maravillosos padres, Sandra López Sánchez y Daniel Acosta Morales, esta tesis está dedicada a ellos, al esfuerzo para darme siempre lo mejor, el amor que siempre me demuestran, la orientación para ser siempre una persona responsable, amable, humilde y decidida, los amo, admiro con todo el corazón, espero algún día Dios me de la sacudirá para poder ser una excelente madre como ustedes lo fueron conmigo, con quien se que puedo confiar en todo momento, quienes me demuestran cada día lo incondicional que es su amor por nosotras, siempre los admiraré como padres, hermanos e hijos.

Junto a ellos siempre estuvieron mis hermanas Jessica Acosta López y Daniela Acosta López, el apoyo incondicional como hermanas es realmente inmenso como el amor que les tengo, de quienes nunca me faltó un regaño, un consejo, una inspiración para mí, y generando siempre una admiración, estuvieron para mí desde mi primer día de vida, cuidándome paso a paso, a mis cuñados quienes también son mi familia Enrique Eleazar Sanchez Vera, una persona que admiro, como profesional, padre, hijo, hermano y pareja, porque todo el apoyo brindado en los últimos años, a José Manuel Morales Castro, a quien admiro su nobleza la dedicación con sus hijos, y que siempre que lo necesito sabe aconsejarme.

Se dice “dime con quien te juntas y te diré quién eres” sin duda alguna tengo a los mejores amigos conmigo, amigos con los que he crecido aprendido, llorado, celebrado, amigos que sé que siempre estarán para mí, amigos que siempre me inspiran a ser mejor cada día, que recibo un consejo, Lic. Maricruz Pérez Mera mi mejor amiga, a quien siempre sabe cómo devolverme cuando me siento perdida, la que siempre tiene las palabras correctas para mí, Ing. Abdaael Tamaturgo Briones un amigo incondicional, que me ha enseñado que aunque todo se vuelva un poco gris a las personas buenas les ira bien, que una sonrisa puede alegrar cualquier día malo, Ing. Andrés Peña Lozano a quien me dio el mejor consejo de este año, quien me dijo “no te preocupes tu podrás hacerlo, te quiero y te admiro, todo ira bien cada día”, quien me habla de dejar miedos atrás.

Mitzy Dayanne Monroy Cerón, mi mejor amiga, mi hilo blanco, una amiga incondicional, no recuerdo ni como comenzamos hacer amigas, un día simplemente nunca se fue, quien comparte toda mi carrera, los mejores años, experiencias, quien me demostró que es ser alguien incondicional para ti, llantos, peleas, gritos, enojos, por todo lo que hemos pasado nos hace ser lo que somos ahora, el que ella siempre estuviera conmigo lo hizo siempre más sencillo, con quien puedo ser soñadora, frágil, solo yo, sin ser juzgada o criticada, gracias por seguir en mi vida, por siempre escucharme, por todos esos momentos que tengo atesorados en mi corazón, y si bien en este momento no se que me de para el destino espero siempre contar con esta amistad, que siempre podamos contar la una con la otra, que los kilómetros no sean un impedimento para seguir siendo las cómplices que siempre fuimos y seguimos siendo, gracias por ser mi otra mitad en amistad.

A.L este año me dejaste los más grandes aprendizajes, como profesional, compañero y amigo, que a pesar de ser poco el tiempo que compartimos gracias a tu orientación estoy donde estoy ahora, desde años atrás siempre estuviste para mí, siempre escuchaste con tanta atención. parte de lo que soy también se lo debo a él, a quien hasta la fecha tengo una fuerte admiración, una conexión que no se romperá en esta vida, parte de mi personalidad mis ambiciones, y mi humildad es por los años compartidos a tu lado, siempre con cariño y amor gracias.

A las personas que lo largo de mi vida han compartido un poco de la suya dejándome siempre un aprendizaje, lección, un recuerdo, e incluso salvado, Ing. Irving Cerón Pérez, de quien no me faltó un consejo y apoyo cuando lo necesite, persona que admiro y aprecio, a una de mis mejores amigas Ing, Liliana Martínez Hernández quien me dio una mano del momento más difícil de mi vida y a quien quiero profundamente.

Índice de contenido

AGRADECIMIENTOS TÉCNICOS	i
AGRADECIMIENTOS PERSONALES	iii
Índice de contenido	v
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Índice de ecuaciones.....	viii
Resumen	ix
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1. Definición del Problema	2
1.2. Justificación.....	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Objetivos	3
Capítulo 2 . Marco teórico.....	5
2.1. Almidón	5
2.2. Estructuras moleculares de amilosa y amilopectina.....	7
2.3. Estructura del almidón	9
2.3.1. Gránulos de almidón (morfología).....	9
2.4. Propiedades	9
2.4.1. Cristalinidad	9
2.4.2 Patrón de difracción por rayos X.....	10
2.4.3. Gelatinización y retrogradación	11
2.5 Almidón de maíz	14
2.6. Morfología del almidón de maíz	17
2.6.1 Estructura supramolecular	19
2.7. Modificaciones del almidón de maíz.	22
2.7.1 Físicas	23
Capítulo 3. Materiales y métodos.....	26
3.1. Materiales	26
3.2. Métodos	26
3.2.1 Obtención de agua activada por plasma (AAP)	26
3.2.2 Tratamiento por microondas	27

3.2.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)	28
3.2.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	28
3.2.5 Difracción de rayos X (DRX)	28
3.2.6 Calorimetría diferencial del barrido (DSC)	29
3.2.7 Análisis termogravimétrico (TGA)	29
3.2.8 Índice de solubilidad en agua (WSI), poder de hinchamiento (SP) y capacidad de retención de agua (WHC).	29
Capítulo 4. Resultados y discusiones	31
4.1 Propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma (AAP)	31
4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)	31
4.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	33
4.4. Difracción de Rayos X (DRX)	36
4.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	38
4.6 Análisis de termogravimetría (TGA).....	39
4.7 Índice de solubilidad en agua (WSI), poder de hinchamiento (SP) y capacidad de retención de agua (WHC).	40
Conclusiones	43
Referencias bibliográficas	44

Índice de figuras

Figura2.1. Estructura de los componentes (McGEE H.2010).....	6
Figura 2. 2. De los gránulos de almidón a los bloques de construcción; un esquema que muestra los diferentes niveles estructurales de los gránulos de almidón (Vamadevan & Bertoft, 2015)	8
Figura 2.3.Patrones de difracción de rayos X de almidones tipo A,B y C(Hizukuri, 1986)	11
Figura 2.4 Almidón gelatinizado (Gelatinización Del Almidón: ¿qué Es? - Blog de Ciencia de Los Alimentos, n.d.)	12
Figura 2.5 Gelatinización y retrogradación (Schober et al., 2008).....	14
Figura 2. 6. Almidón de maíz (Obadi et al., 2023)	15

Figura 2. 7. MEB del almidón de maíz (Vamadevan & Bertoft, 2015)	17
Figura 2.8. MEB Almidón de maíz norma (Obadi et al., 2023)l	18
Figura 2.9. MEB del almidón de maíz alto en amilosa (Obadi et al., 2023)	18
Figura 2.10. MEB del almidón ceroso (Obadi et al., 2023).....	19
Figura 2.11 Gránulo de almidón (Schober et al., 2008).....	20
Figura 2.12 Modelo de la estructura del almidón de acuerdo con Jenkins(Bello-Pérez et al., 1998)	21
Figura 2.13 Estructura del gránulo de almidón a diferentes niveles de organización (Bello-Pérez et al., 1998).....	22
Figura 3.14. Obtención de agua activada por plasma (creación propia Acosta, 2024)	26
Figura 3.15. Tratamiento de microondas (creación propia Acosta, 2024)	27
Figura 4.16 Imágenes de MEB de almidones de maíz nativos y modificados (creación propia Acosta,2024).....	32
Figura 4.17 Espectro FT-IR (creación propia Acosta, 2024)	34
Figura 4.18 Deconvoluciones (creación propia Acosta, 2024)	35
Figura 4.19 Espectro de DRX almidones nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)	37
Figura 4.20. Analisis TGA de almidones nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)	40

Índice de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los almidones(Vamadevan & Bertoft, 2015)	6
Tabla2.2 Clasificación del amidón de maíz por su relación amilosa-amilopectina (creación propia Acosta, 2024).....	16
Tabla 4.3 Propiedades fisicoquímicas del agua destilada después de estar en contacto con el plasma (creación propia Acosta, 2024)	31
Tabla 4. 4. Relación 1047-1022, 995-1022 (creación propia Acosta, 2024).....	35
Tabla 4.5 Transiciones térmicas de almidones nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)	38

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Poder de hinchamiento (Flores-Silva et al., 2023).....	30
Ecuación 2 índice de solubilidad (Flores-Silva et al., 2023).....	30
Ecuación 3 Capacidad de retención de agua(Flores-Silva et al., 2023).....	30

Resumen

El almidón, un polisacárido integrado por amilopectina (estructura ramificada) y amilosa (estructura lineal), es ampliamente empleado en diversas industrias debido a sus características funcionales. Sin embargo, su forma nativa tiene limitaciones, como una baja estabilidad, que requiere ser mejorada mediante modificaciones para ampliar su utilidad. La amilosa, con su configuración lineal, forma hélices dobles (alomorfos A y B), mientras que la amilopectina, al ser ramificada, influye en el grado de cristalinidad de los gránulos, el cual varía entre un 15% y un 45%. Estos gránulos se clasifican en tipos A (cereales), B (tubérculos) y C (mixtos). Durante el proceso de gelatinización, el almidón pasa de una estructura cristalina a una amorfa. Según su composición, el almidón de maíz puede ser normal (70-80% amilopectina y 20-30% amilosa), ceroso (95-100% amilopectina) o alto en amilosa (70-80% amilosa). Las modificaciones físicas, como las aplicadas mediante microondas y agua activada por plasma (AAP), alteran su estructura sin modificar su composición química. Las microondas producen porosidad y desorganizan las hélices dobles, mientras que el AAP incorpora especies reactivas que afectan tanto la superficie como la estructura interna del almidón. Estas modificaciones tienen impacto en sus propiedades térmicas y funcionales: las microondas incrementan la cristalinidad mediante la reorganización molecular, mientras que el tratamiento combinado con AAP reduce la cristalinidad, favoreciendo estructuras más amorfas con mayor capacidad de absorción de agua. Esto resulta en un almidón modificado más estable térmicamente, con mayor capacidad de retención de agua y entalpía de gelatinización, lo que lo convierte en un material versátil y sostenible para diversas aplicaciones industriales, como alimentos, bioplásticos y textiles.

Capítulo 1. Generalidades

El almidón, es un polisacárido esencial en la nutrición y la industria, se presenta de forma nativa en gránulos semicristalinos que contienen dos poliglucanos principales: la amilopectina y la amilosa (Pérez & Bertoft, 2010). La amilopectina, con su estructura altamente ramificada, constituye la mayor parte del almidón, mientras que la amilosa, que presenta una configuración más lineal, representa un porcentaje menor del mismo (Tao et al., 2020). Esta variabilidad en la composición química y estructural del almidón influye en sus propiedades funcionales, determinando su comportamiento en diversas aplicaciones, desde la alimentación hasta la fabricación de bioplásticos y adhesivos (Sinhmar et al., 2023).

No obstante, el almidón nativo presenta limitaciones en estabilidad y, generalmente, no es apto para aplicaciones industriales directas. Por lo tanto, es imperativo modificarlo para ampliar su utilidad en la industria. Las modificaciones pueden ser de naturaleza química o física; el almidón modificado físicamente representa una alternativa más sostenible, ya que no implica el uso de reactivos químicos nocivos para el medio ambiente (Sifuentes-Nieves et al., 2024). En contraste, las modificaciones químicas requieren la adición de agentes que pueden generar residuos, los cuales deben ser gestionados de manera adecuada para minimizar su impacto ambiental (Yi et al., 2024). El análisis del almidón se enriquece al considerar su morfología y la organización molecular de sus gránulos. A través de diversas técnicas de caracterización, como la microscopía electrónica de barrido, la difracción de rayos y transformada de Fourier, se puede investigar la complejidad estructural del almidón y su respuesta a tratamientos físicos y químicos (Sifuentes-Nieves, Mendez-Montealvo, et al., 2021). En este contexto, el presente trabajo se centra en el almidón de maíz, un recurso clave en diversas aplicaciones, y se propone evaluar el efecto de un tratamiento dual que combina microondas y agua activada en su estructura y funcionalidad. A medida que avanzamos en esta investigación, se busca no solo profundizar en las características del almidón modificado, sino también contribuir al desarrollo de aplicaciones más sostenibles y eficientes de este polisacárido esencial (Flores-Silva et al., 2023).

1.1. Definición del Problema

La modificación física del almidón de maíz tiene un enfoque sustentable porque aprovecha procesos mecánicos, térmicos o ambientales que no requieren el uso de reactivos químicos potencialmente contaminantes ni generan subproductos tóxicos, lo que la hace más respetuosa con el medio ambiente. Este tipo de modificación elimina o minimiza los residuos químicos asociados a las modificaciones químicas del almidón y disminuye la necesidad de tratamiento de efluentes industriales contaminados. Además, el almidón de maíz es una biomolécula de origen renovable y biodegradable derivada de cultivos agrícolas, cuya modificación física permite aumentar su valor agregado sin comprometer su carácter natural. Las modificaciones físicas producen almidones adaptados para aplicaciones específicas, fomentando el desarrollo de productos más limpios y amigables con el medio ambiente. Asimismo, los residuos generados en el procesamiento del almidón, como cascarillas de maíz o subproductos del grano, pueden integrarse en sistemas de reciclaje o valorización, cerrando el ciclo productivo. La sostenibilidad es clave, optar por modificaciones físicas del almidón de maíz representa una estrategia responsable que reduce el impacto ambiental, fomenta el uso de recursos renovables.

1.2. Justificación

El desarrollo de este estudio responde a la necesidad de abordar limitaciones estructurales y funcionales del almidón de maíz nativo, haciéndolo más adecuado para aplicaciones industriales. Sustentabilidad y cuidado ambiental; las modificaciones físicas del almidón, como las que utiliza este trabajo (microondas y agua activada por plasma), representan una alternativa más amigable con el medio ambiente (Flores-Silva et al., 2023). Estos métodos evitan el uso de reactivos químicos potencialmente contaminantes, alineándose con los principios de sostenibilidad y producción limpia, aprovechamiento de recursos renovables; el almidón de maíz es un polisacárido biodegradable y abundante, derivado de un recurso renovable: el maíz industrial (Sifuentes-Nieves et al., 2024). Este enfoque fortalece su valor industrial como materia prima económica y respetuosa con el

medio ambiente, contribuyendo a una economía circular y avances tecnológicos en la modificación de materiales; combinación de tecnologías emergentes como el uso de microondas y agua activada por plasma ofrece una metodología innovadora permitiendo no solo modificar la estructura y funcionalidad del almidón, sino también explorar nuevos campos de aplicación, maximizando su potencial industrial (Sifuentes-Nieves et al., 2024). La contribución a la eficiencia industrial; es la mejora de las propiedades estructurales, térmicas y funcionales del almidón facilita su uso en sectores como el alimentario, farmacéutico, textil, y la producción de bioplásticos, promoviendo la sustitución de materiales sintéticos y el desarrollo de productos más sostenibles, el impacto en la competitividad y reducción de costos al optimizar el almidón mediante métodos físicos, se incrementa su valor agregado, eliminando la necesidad de procesos químicos costosos y complejos (Sifuentes-Nieves et al., 2024). Esto beneficia tanto a los productores como a los consumidores finales, al ofrecer soluciones más económicas y responsable como relevancia científica y tecnológica; el estudio amplía el conocimiento sobre las transformaciones estructurales y funcionales del almidón sometido a procesos físicos avanzados (Flores-Silva et al., 2023). Los resultados no solo enriquecen la literatura científica, sino que también sientan las bases para futuros desarrollos tecnológicos en aplicaciones más eficientes y sostenibles de este polisacárido esencial.

1.3. Hipótesis

Se espera ver cambios en el hinchamiento, retención de agua, solubilidad, cambios en la morfología, estructura y cristalinidad del almidón de maíz, con tratamiento dual de agua activada por plasma y microondas, en comparación con la modificación por separado.

1.4. Objetivos

Evaluar el efecto del tratamiento dual de microondas con agua activada mediante técnicas de caracterización de materiales para identificar las propiedades estructurales, térmicas, fisicoquímicas y funcionales de almidón de maíz.

Particulares

- Modificar el almidón de maíz con el tratamiento dual microondas- agua activada para evaluar las propiedades del almidón de maíz modificado.
- Evaluar las propiedades estructurales, térmicas y fisicoquímicas del almidón de maíz modificado, mediante técnicas de caracterización FT-IR, rayos X y MEB para determinar la funcionabilidad.

Capítulo 2 . Marco teórico

El almidón es un polisacárido de reserva formado por amilosa y amilopectina, cuyas estructuras determinan su organización desde el nivel molecular hasta la formación de gránulos con regiones cristalinas y amorfas. Esta organización influye directamente en propiedades como la cristalinidad, los patrones de difracción de rayos X y procesos como la gelatinización y la retrogradación, los cuales definen su comportamiento fisicoquímico y funcional. En el caso del almidón de maíz, sus características morfológicas y su estructura supramolecular condicionan su desempeño en distintas aplicaciones; sin embargo, presenta limitaciones que han llevado al desarrollo de modificaciones físicas para mejorar sus propiedades. En este sentido, la combinación de agua activada por plasma y el tratamiento por microondas representa una alternativa innovadora para generar cambios estructurales a diferentes niveles y optimizar su funcionalidad.

2.1. Almidón

El almidón se presenta en su forma nativa como gránulos semicristalinos compuestos principalmente por dos poliglucanos: amilosa y amilopectina. La amilosa es el componente menor, que representa entre el 15% y el 35% del peso total del almidón (Pérez & Bertoft, 2010). Su estructura es principalmente lineal, con cadenas mucho más largas que las de la amilopectina, aunque una parte de la amilosa presenta ligera ramificación. Por otro lado, la amilopectina es el componente predominante en la mayoría de los almidones, con una estructura altamente ramificada que consiste en cadenas cortas de unidades de D-glucosilo unidas por enlaces (1,4) y conectadas mediante enlaces α -(1,6). Almidones normales relación amilosa: amilopectina. Además, muchos almidones, especialmente aquellos con mayor contenido de amilosa (Tao et al., 2020).

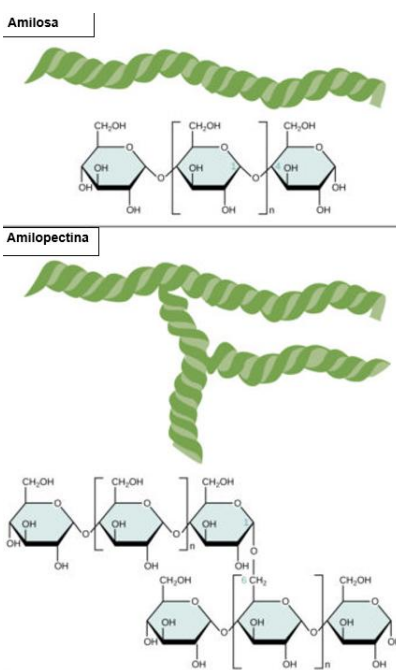
Los almidones se pueden clasificar por diferentes categorías: tamaño, relación amilosa-amilopectina, forma, fuente botánica, tipo de cristalinidad, diámetro y tipo (tabla 2.1). Las fuentes principales de almidón para aplicaciones comerciales son el maíz, la papa, la yuca (también conocida como tapioca o mandioca) y el trigo, otras

fuentes comerciales son, el arroz, la batata, el frijol mungo, el sorgo, el sagú y la cebada (Jiang et al., 2023).

Tabla 2.1. Clasificación de los almidones(Vamadevan & Bertoft, 2015)

Tipo	Maíz	Trigo	Cebada	Tapioca	Papa
Fuente botánica	Cereal	Cereal	Cereal	Raíz	Tubérculo
Forma	Redondo, poligonal	Redondo, lenticular	Redondo, lenticular	Ovalado, truncado	Redondo, ovalado
Diámetro (mm)	2-30	1-40a	2-40a	4-45	5-100
Tipo de cristalinidad	A	A	A	A ó C	B
Amilosa %	23-32	23-29	22-27	17-33	18-29

a) El trigo y la cebada contienen dos poblaciones de gránulos: gránulos lenticulares grandes (-A) con diámetro >10mm y gránulos redondos y pequeños (B-) <10mm



2.1. Estructura de los componentes (McGEE H.2010)

También, existen ciertas plantas mutantes que producen almidones con poca amilosa, conocidas como cerosos (por ejemplo, almidón de maíz/papa ceroso).

Otros producen almidones con alto contenido (70%-80%) de amilosa (por ejemplo, amilomaize o Hylon) (Pérez & Bertoft, 2010).

2.2. Estructuras moleculares de amilosa y amilopectina

La amilosa presenta un grado de polimerización (GP) entre 900 y 3,300, y sus cadenas tienen una longitud media de 270 a 525 unidades de glucosilo. Dependiendo de la fuente de almidón, la fracción ramificada de la amilosa puede contener de 5 a 20 cadenas (Vamadevan & Bertoft, 2015). La amilosa tiende a cristalizar en dobles hélices zurdas, formando alomorfos de tipo A y B. El alomorfo tipo A tiene una celda unitaria monoclinica y una composición de agua diferente en comparación con el tipo B (Pérez & Bertoft, 2010). La amilopectina, por otro lado, es más compleja, con un GP que varía entre 4,800 y 15,900. Su longitud promedio de cadena es de 18 a 27 residuos de glucosa, y sus cadenas se dividen en cortas y largas (Vamadevan & Bertoft, 2015). Aproximadamente el 5% de los residuos forman enlaces (1,6), creando una estructura que incluye cadenas A y B, la relación de estas cadenas varía según la muestra de almidón. Existen cuatro tipos de amilopectina basados en la longitud (cortas, menos de 100 unidades de glucosa y largas más de 100) y distribución de sus cadenas internas (cadenas lineales y estructura helicoidal) (Pérez & Bertoft, 2010). La organización de las cadenas es fundamental para comprender la estructura global de la macromolécula, niveles (granulo, anillos, lamels, bloklets, hélices) y se han propuesto dos modelos: el modelo de clúster, que sugiere que las cadenas cortas quien forman conglomerados interconectados por cadenas largas, y el modelo de columna vertebral de bloques de construcción, donde las cadenas se agrupan en unidades más pequeñas (Figura 2.2) (Pérez & Bertoft, 2010).

Aunque no se ha demostrado experimentalmente cuál de los dos modelos es correcto, las características estructurales observadas apoyan más al modelo de columna vertebral. Sin embargo, lo que si se sabe es que a estructura esta relacionada con las propiedades funcionales del almidón (Pérez & Bertoft, 2010).

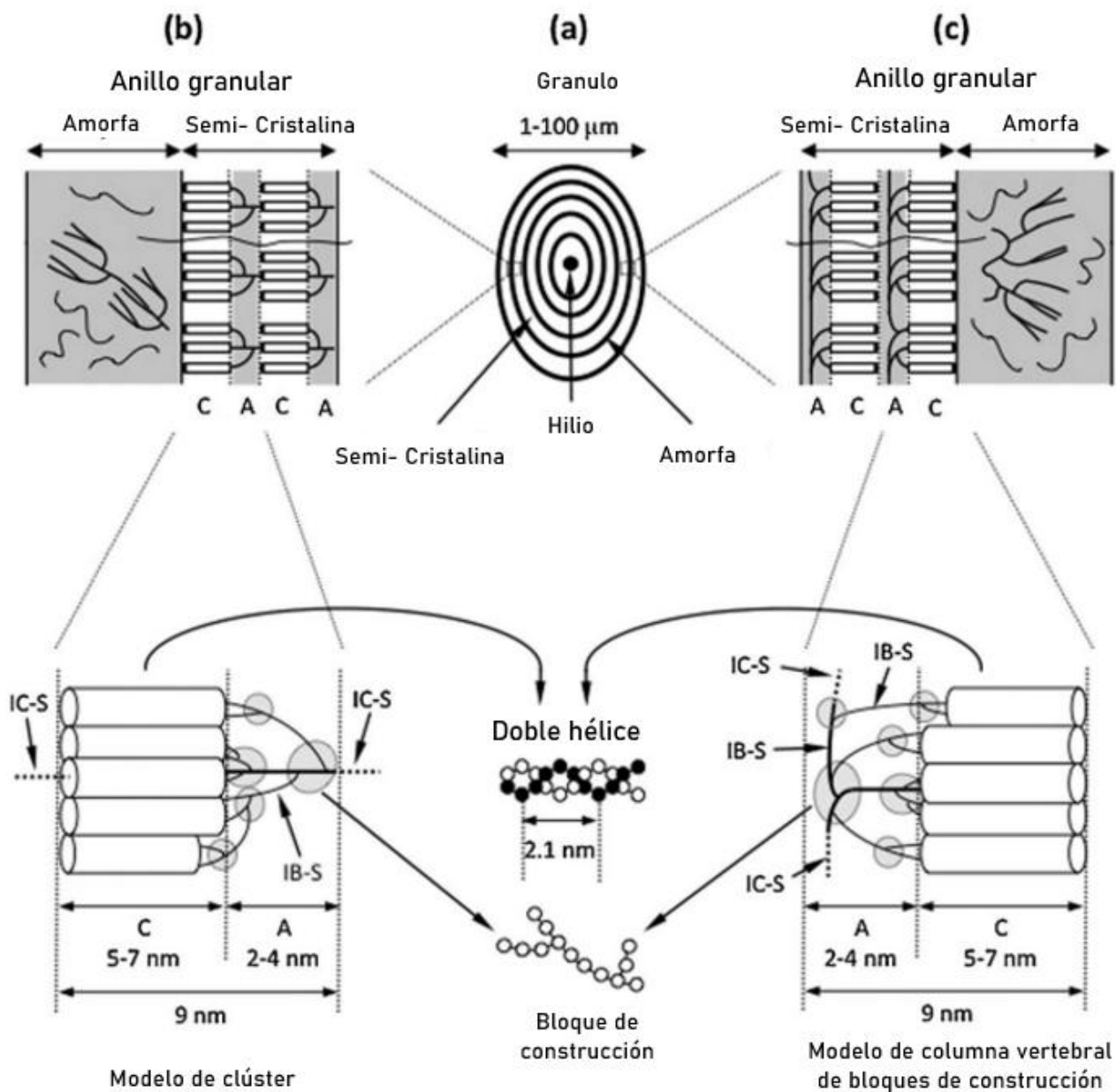


Figura 2. 2. De los gránulos de almidón a los bloques de construcción; un esquema que muestra los diferentes niveles estructurales de los gránulos de almidón (Vamadevan & Bertoft, 2015)

2.3. Estructura del almidón

2.3.1. Gránulos de almidón (morfología)

El tamaño y la morfología de los gránulos de almidón varían significativamente entre diferentes especies de plantas, con diámetros que oscilan entre menos de 1 μm y hasta 100 μm (Vamadevan & Bertoft, 2015). Generalmente, los gránulos de los cereales son más pequeños que los de raíces o tubérculos. Estos gránulos son semicristalinos, compuestos de estructuras cristalinas y amorfas. Al ser observados bajo un microscopio, presentan anillos o capas llamadas "anillos de crecimiento", que consisten en alternancias de estructuras amorfas y semicristalinas, con un espesor típico de 100–400 nm. Los anillos semicristalinos están formados por pilas alternas de laminillas cristalinas y amorfas, con una distancia de repetición de aproximadamente 9 nm. Las cadenas cortas de amilopectina forman hélices dobles que dan lugar al alomorfo de tipo A en cereales y al tipo B en tubérculos (Pérez & Bertoft, 2010). Algunas leguminosas presentan cristales mixtos, conocidos como gránulos de tipo C, con tipo B en el centro y tipo A en la periferia. Las laminillas amorfas albergan la mayoría de las ramas de amilopectina y las cadenas internas. Se han identificado "bloques" de aproximadamente 20 a 100 nm en la estructura de los gránulos, que podrían encontrarse tanto en anillos amorfos como semicristalinos. Estos bloques en las laminillas cristalinas parecen tener una estructura más definida que en las amorfas. Además, se ha propuesto la existencia de una superhélice para la amilopectina, aunque su existencia y relación con las demás estructuras granulares siguen siendo objeto de debate.

2.4. Propiedades

2.4.1. Cristalinidad

Los gránulos de almidón están formados por estructuras semicristalinas compactas, con un grado de cristalinidad que oscila entre el 15% y el 45%, y una densidad

aproximada de 1,5 g/cm³. Bajo luz polarizada, la mayoría de los gránulos nativos muestran una cruz de Malta, lo que indica una birrefringencia positiva y sugiere que los cristallitos están organizados radialmente en el interior del grano (Pérez & Bertoft, 2010). Este grado de cristalinidad, que se refiere al porcentaje de zonas cristalinas en relación con el total del material, influye directamente en las propiedades y usos del almidón. Dentro de los gránulos, las regiones cristalinas actúan como barreras que afectan la funcionalidad del almidón (Blazek & Gilbert, 2010).

La estructura cristalina también juega un papel fundamental en diversas aplicaciones industriales. La proporción de amilosa y amilopectina, junto con la disposición cristalina del almidón, tiene un impacto en la resistencia y rigidez de los plásticos elaborados a partir de él (Yangcheng et al., 2013). En la fabricación de plásticos de almidón, se forma una red estructural mediante la combinación de almidón con plastificantes, pero la corta longitud de las cadenas de amilopectina reduce la resistencia de estos materiales (Zhao et al., 2018). En cambio, cuando el almidón tiene un alto contenido de amilopectina, con cadenas largas y mayor cristalinidad, los plásticos resultantes son más resistentes. Por otro lado, un almidón con mayor proporción de amilosa o con amilopectina de cadenas cortas y baja cristalinidad favorece una hidrólisis más rápida y un mejor rendimiento en la producción de bioetanol (Yangcheng et al., 2013).

2.4.2 Patrón de difracción por rayos X

La difracción de rayos X (DRX) se emplea para estudiar la estructura de las zonas cristalinas. El almidón puede clasificarse en varios tipos según sus patrones de difracción: tipo A (15-25 μm), tipo B (2-5 μm), tipo C y tipo V. Los almidones de maíz, tanto normales como cerosos, presentan un patrón de tipo A mientras que los altos en amilosa u patrón tipo B (Sinhmar et al., 2023). Cuando el contenido de amilosa es elevado, la estructura cristalina tiende a transformarse de tipo A (donde las hélices dobles se organizan en una celda unitaria monoclinica) a tipo C (una combinación de los tipos A y B) y, finalmente, a tipo B (donde las hélices dobles se agrupan en una celda unitaria hexagonal) (Figura 2.3), lo que resulta en una disminución de la cristalinidad relativa (Yi et al., 2024).

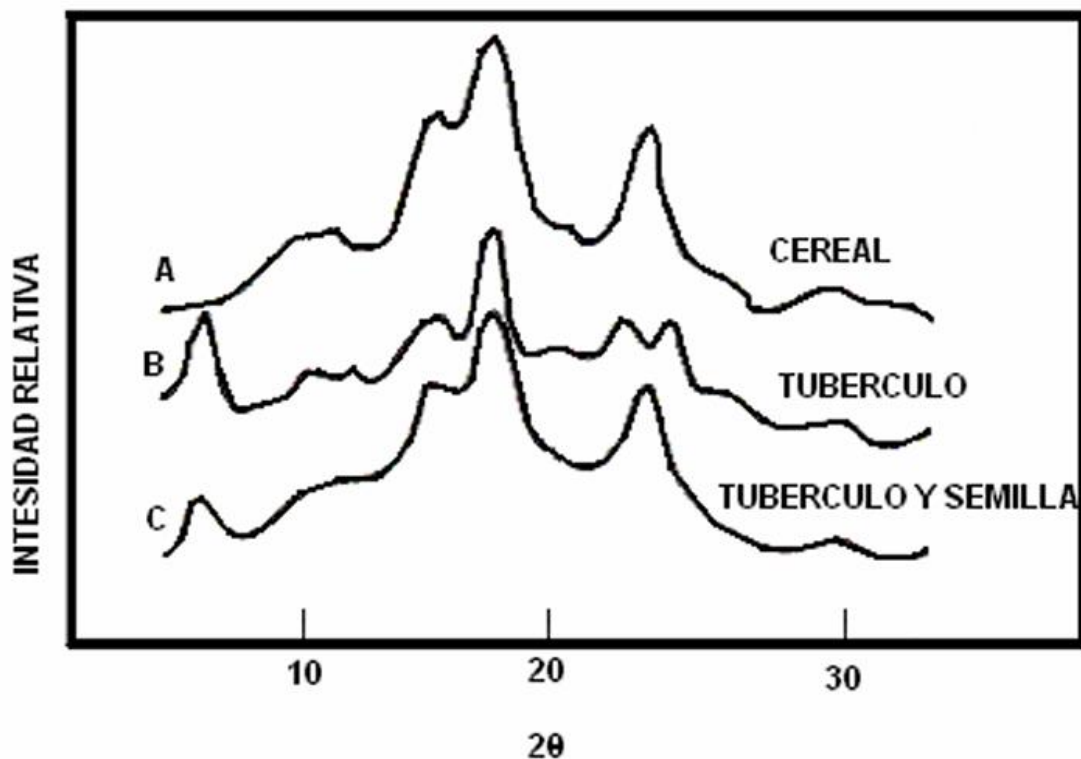


Figura 2.3 Patrones de difracción de rayos X de almidones tipo A,B y C (Hizukuri, 1986.)

Las largas cadenas de amilopectina favorecen la formación del polimorfo tipo B, mientras que las cadenas más cortas tienden a favorecer el tipo A. Por ejemplo, una alta proporción de cadenas largas de amilopectina y una gran distancia entre las ramificaciones en almidones con alto contenido de amilosa favorecen el polimorfo tipo B. La cristalinidad relativa de los almidones de maíz normales se ha encontrado que varía entre el 22,31 % y el 28,1 %, mientras que la de los cerosos se sitúa entre el 34,2 % y el 43 %. Esto puede deberse a que la amilosa no ayuda a formar estructuras ordenadas en los gránulos de almidón, sino que se encuentra en las regiones amorfas (Han et al., 2021).

2.4.3. Gelatinización y retrogradación

La gelatinización es un fenómeno que implica la disociación de las dobles hélices de la estructura cristalina de la amilopectina en presencia de agua (en una

proporción superior al 70 % en base al peso seco del almidón) debido al efecto de la temperatura, transformando el almidón de un estado semicristalino a una estructura amorfa y gelatinosa (Figura 2.4). Inicialmente, cuando el almidón entra en contacto con agua fría, las moléculas de agua penetran en los gránulos sin generar cambios significativos; sin embargo, al calentar la mezcla, el agua se difunde más profundamente, debilitando los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de amilosa y amilopectina, lo que permite que los gránulos se hinchen progresivamente. A temperaturas entre 60-80 °C, las regiones cristalinas del almidón se rompen, los gránulos pierden su integridad y el sistema se convierte en una suspensión viscosa, donde el almidón gelatinizado forma una matriz que atrapa agua, generando una textura espesa y pegajosa (Agama-Acevedo et al., 2011.).



Figura 2.4 Almidón gelatinizado (Gelatinización Del Almidón: ¿qué Es? - Blog de Ciencia de Los Alimentos, n.d.)

Durante la gelatinización la estructura cristalina de la amilopectina se disocia, lo que provoca la ruptura de los gránulos de almidón y la liberación de amilosa (Huang et

al., 2021). Este cambio estructural se puede medir mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), que evalúa la temperatura y la entalpía necesarias para la gelatinización.

Los almidones con mayor contenido de amilosa requieren temperaturas más altas para gelatinizarse, debido a la estabilidad de sus estructuras de doble hélice ya que la amilosa contribuye a la formación de láminas cristalinas que refuerzan la estructura del almidón (Vamadevan & Bertoft, 2015).

En contraste, los almidones con mayor proporción de amilopectina, como los de maíz ceroso, tienen temperaturas de gelatinización más bajas (Obadi et al., 2023).

La retrogradación del almidón es un proceso en el que las cadenas de glucosa del almidón gelatinizado se reorganizan y recristalizan, formando enlaces de hidrógeno. Las cadenas lineales de amilosa (AM) tienden a reorganizarse más rápidamente que las de amilopectina (AP), debido a su estructura más sencilla. En general, los almidones con mayor contenido de amilosa retrogradan más rápidamente, a diferencia de los almidones de cereales, que tienen cadenas de AP más cortas y retrogradan de manera más lenta (Obadi et al., 2023). Por ejemplo, los almidones de maíz blanco experimentan una retrogradación más ordenada, con cristales mejor formados, mientras que los almidones de maíz azul retrogradan a una velocidad mayor. La entalpía de retrogradación refleja el grado de reordenamiento estructural del almidón, siendo mayor en los almidones de maíz blanco, lo que indica una retrogradación más pronunciada en comparación con los almidones de maíz azul (Agraria et al., 2010).

Durante la retrogradación, la amilosa forma una red estructural a través de enlaces de hidrógeno, lo que facilita el reordenamiento del almidón. Este fenómeno depende de la longitud de las cadenas más largas favorecen una retrogradación más rápida (Sinhmar et al., 2023)

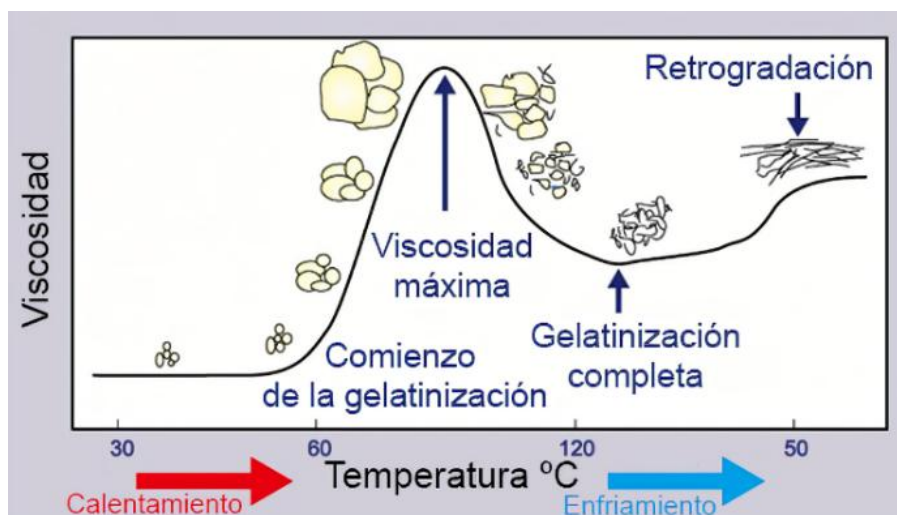


Figura 2.5 Gelatinización y retrogradación (Schober et al., 2008)

Tanto la retrogradación como la gelatinización del almidón están influenciadas por factores como la estructura molecular, la relación amilosa-amilopectina y la longitud de las cadenas de amilosa (Figura 2.5). Estos factores afectan tanto la temperatura y la energía necesarias para la gelatinización como la velocidad de la retrogradación del almidón (Huang et al., 2021).

2.5 Almidón de maíz

El almidón de maíz es un polvo blanco (Figura 2.6) ampliamente utilizado en diversas industrias debido a sus propiedades funcionales. En la industria alimentaria, se emplea como espesante y estabilizante en productos como salsas, pudines y productos horneados, donde se busca obtener una textura suave y cremosa, además de ser utilizado en alimentos que requieren una textura firme o una digestibilidad controlada. En otras industrias, como la fabricación de papel, adhesivos, textiles, productos farmacéuticos y bioplásticos, se valora por sus propiedades de gelificación y estabilidad. Según la forma de sus gránulos y la composición de sus componentes, amilosa y amilopectina, el almidón de maíz se clasifica en tres tipos principales: el almidón normal, con gránulos redondeados o

poligonales y una composición de 70-80 % de amilopectina y 20-30 % de amilosa; el almidón ceroso, con gránulos ovalados o elipsoidales y una proporción de 95-100 % de amilopectina y solo 0-5 % de amilosa; y el almidón alto en amilosa, con gránulos elipsoidales o irregulares, compuesto por 20-30 % de amilopectina y 70-80 % de amilosa. Cada uno de estos tipos presenta características únicas, como diferentes capacidades de gelatinización y propiedades de hidrosolubilidad, fundamentales para sus aplicaciones específicas en la industria como se describe en la Tabla 2.2. (Agraria et al., 2010).



Figura 2.6. Almidón de maíz (Obadi et al., 2023)

Tabla 2.2 Clasificación del almidón de maíz por su relación amilosa-amilopectina (creación propia Acosta, 2024)

ALMIDÓN	NORMAL	CEROSO	ALTO EN AMILOSA
Amilopectina			
Descripción	Constituye aproximadamente el 70-80% del almidón normal	Constituye aproximadamente el 95-100% del almidón ceroso	La amilopectina representa entre el 20% y el 30% del almidón
Propiedades	Proporciona al almidón su capacidad de gelatinización y viscosidad	Mayor viscosidad y una mejor capacidad de gelatinización.	Textura más firme y menos pegajosa en comparación con otros tipos de almidón.
Amilosa			
Descripción	Es una cadena lineal de glucosa que representa aproximadamente el 20-30% del almidón normal.	Presenta contenido de amilosa muy bajo (generalmente menos del 5%), lo que lo diferencia del almidón normal.	Este tipo de almidón tiene un alto contenido de amilosa, que puede variar entre el 70% y el 80%.
Propiedades físicas y químicas			
Hidrosolubilidad	El almidón normal no es soluble en agua fría, pero se gelatiniza al calentarse en presencia de agua.	Similar al almidón normal, el almidón ceroso no es soluble en agua fría, pero se gelatiniza al calentarse.	Al igual que otros tipos de almidón, el almidón alto en amilosa no es soluble en agua fría, pero se gelatiniza al calentarse.
Capacidad de Gelatinización	La temperatura de gelatinización generalmente se encuentra entre 60°C y 70°C	Tiene una temperatura de gelatinización más baja, típicamente entre 55°C y 65°C	Tiene una temperatura de gelatinización más alta, que puede variar entre 70°C y 80°C
Gránulos	Redondeados o poligonales	Ovalados o elipsoidales.	Elipsoidales o incluso irregulares
Aplicaciones			
Alimentos	Como espesante y estabilizante en salsas, pudines y productos horneados	Como espesante en productos como salsas, pudines y productos horneados, donde se busca una textura suave y cremosa	En productos que requieren una textura firme y una digestibilidad controlada, como en productos horneados y alimentos para diabéticos.
Industrial	En la fabricación de papel, textiles y productos farmacéuticos	En la fabricación de productos como papel, adhesivos y en la industria farmacéutica.	En la fabricación de bioplásticos, papel y productos farmacéuticos, donde se valoran sus propiedades de gelificación y estabilidad.

2.6. Morfología del almidón de maíz

La morfología del almidón de maíz (Figura 2.7) impacta su capacidad para absorber agua, ya que los gránulos pueden hincharse y gelatinizar al ser calentados en agua, lo que provoca cambios en su forma y tamaño.

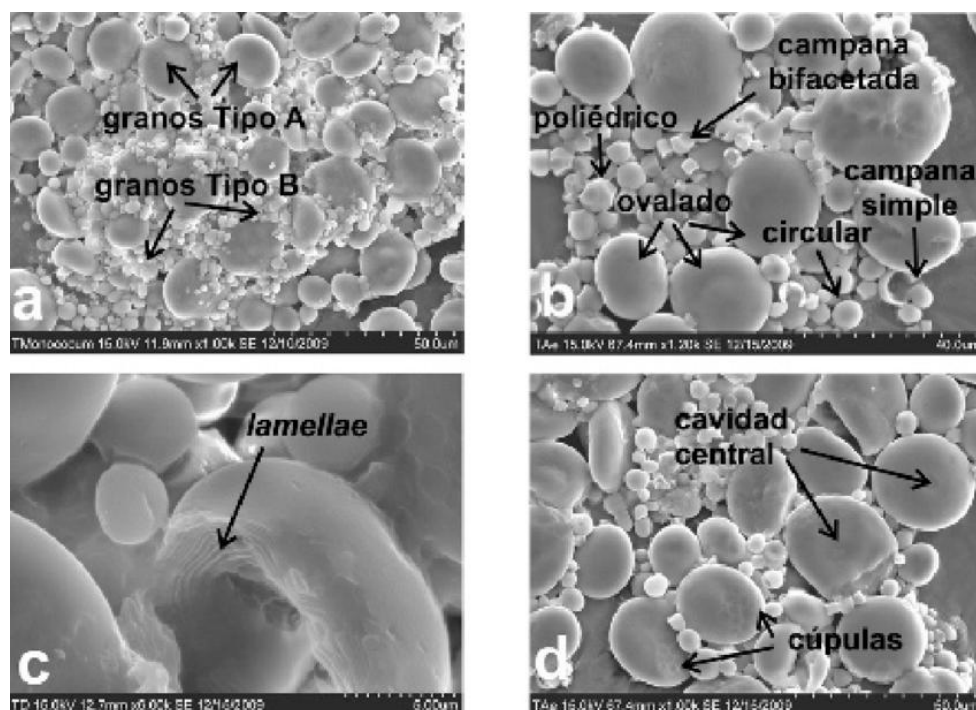


Figura 2.7. MEB del almidón de maíz (Vamadevan & Bertoft, 2015)

Los gránulos de almidón de maíz normal poseen una estructura compacta y bien organizada, donde la amilopectina forma una red ramificada y la amilosa se presenta en cadenas más lineales. Esta disposición tridimensional es esencial para su funcionalidad. Su tamaño varía generalmente entre 5 y 25 micrómetros de diámetro, y suelen tener formas mayormente esféricas u ovaladas, aunque algunas pueden ser más irregulares (Figura 2.8) (Obadi et al., 2023).

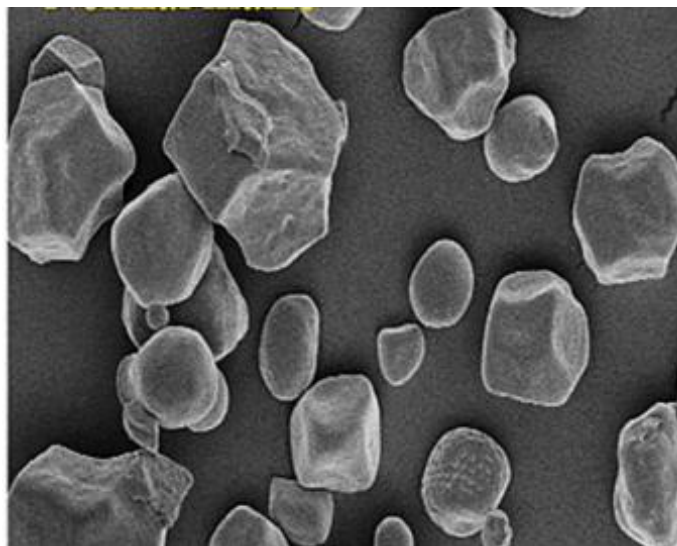


Figura 2.8. MEB Almidón de maíz norma (Obadi et al., 2023)

Los gránulos de almidón alto en amilosa suelen ser más pequeños y más uniformes que los del almidón ceroso. Su estructura consiste en cadenas lineales de glucosa dispuestas de manera más ordenada, lo que influye en su comportamiento durante la gelatinización. Generalmente, su tamaño varía entre 1 y 10 micrómetros de diámetro y frecuentemente tienen una forma ovalada o esférica (Figura 2.9) (Obadi et al., 2023).

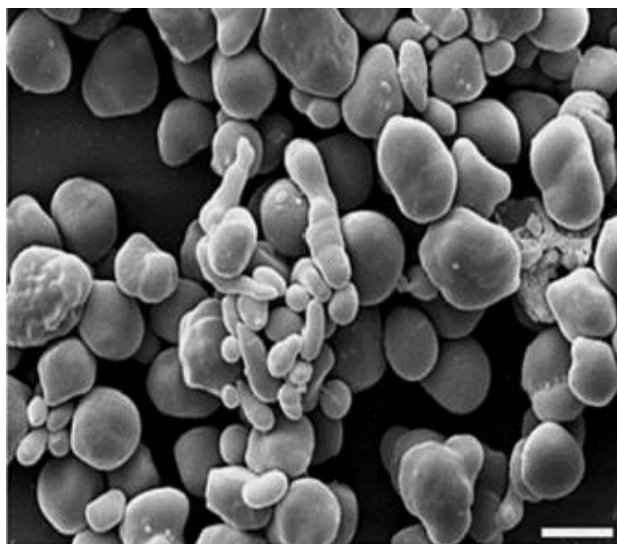


Figura 2.9. MEB del almidón de maíz alto en amilosa (Obadi et al., 2023)

Los gránulos de almidón ceroso suelen ser más grandes y presentan una forma irregular, con bordes más suaves. Su estructura consiste en largas cadenas ramificadas de glucosa que se organizan en una red tridimensional. Además, su tamaño generalmente varía entre 5 y 25 micrómetros de diámetro. (Figura 2.10) (Obadi et al., 2023).

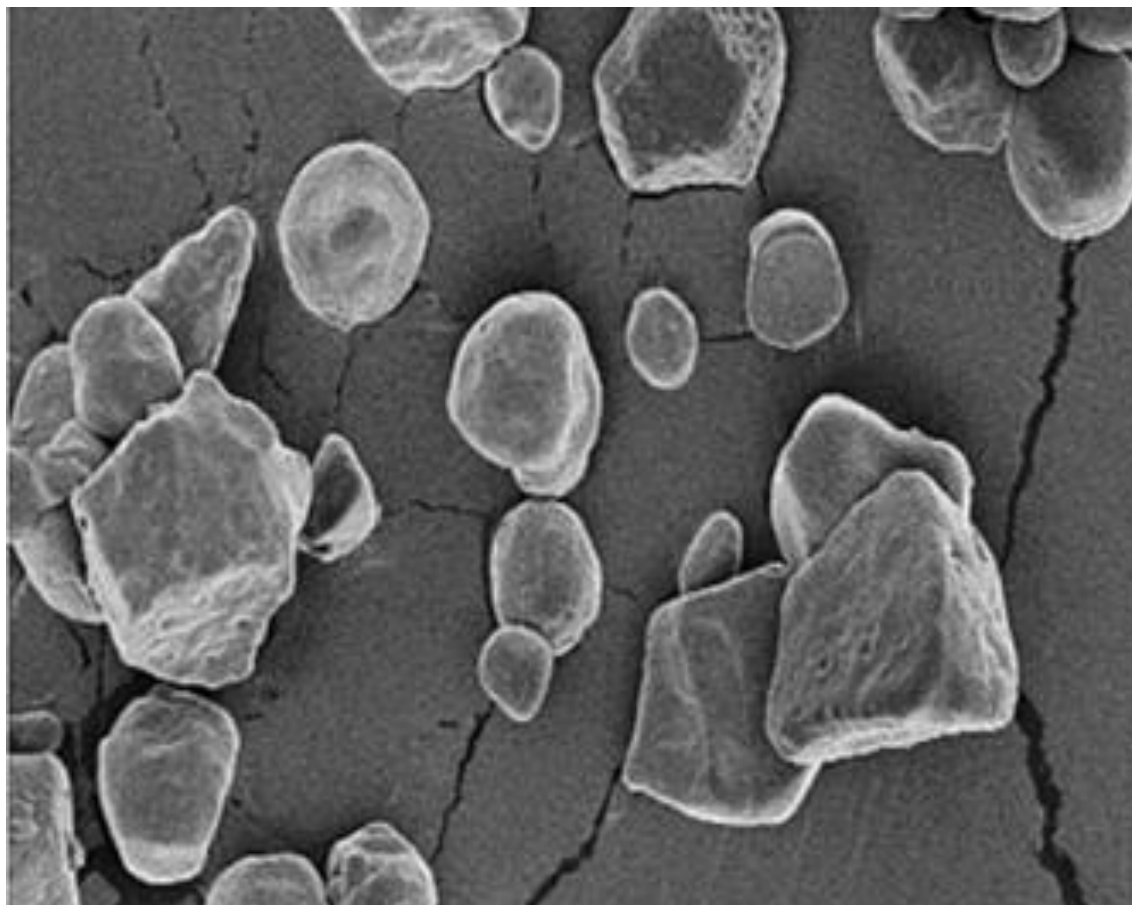


Figura 2.10. MEB del almidón ceroso (Obadi et al., 2023)

2.6.1 Estructura supramolecular

La estructura supramolecular del almidón de maíz está determinada por el arreglo de sus componentes, principalmente la amilopectina, en diferentes niveles de organización dentro del gránulo. Este arreglo influye en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales.

Tipo A: Presenta un empaquetamiento compacto con bajo contenido de agua (4-8 moléculas por hélice), una estructura cristalina monoclinica, y es típica de almidones de cereales, como el maíz.

Tipo B: Tiene una estructura más abierta con alto contenido de agua (36 moléculas por hélice), una configuración hexagonal, y se encuentra en almidones de tubérculos o altos en amilosa.

Tipo C: Es una combinación de los tipos A y B, pero con mayor similitud al tipo A.

El ordenamiento dentro de los gránulos puede variar desde el centro hacia la periferia, con transiciones entre tipos cristalinos (por ejemplo, del tipo A al tipo B), generalmente asociadas con cambios en la cristalinidad y el contenido de amilosa. En cuanto a los patrones de difracción de rayos X, los almidones tipo A presentan picos característicos en ángulos $2\theta = 15^\circ$ y 23° , mientras que los tipos B muestran picos en $2\theta = 5.6^\circ$, 15° y 24° . Estas diferencias reflejan la estructura y origen del almidón (Bello-Pérez et al., 1998).

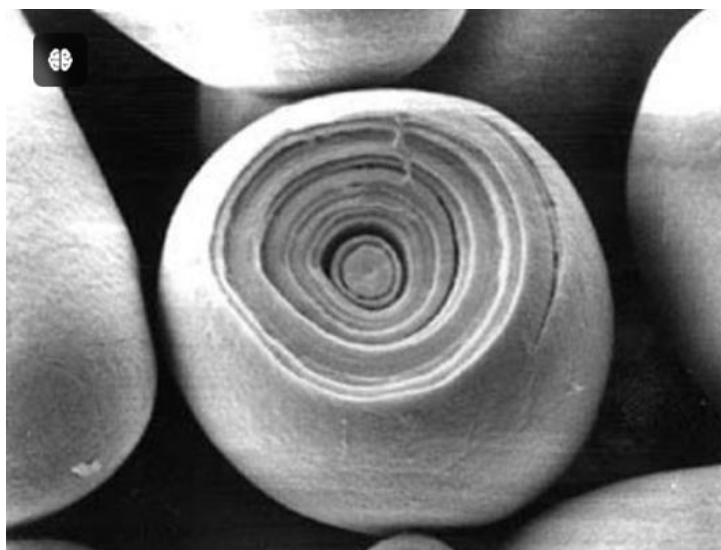


Figura 2.11. Gránulo de almidón (Schober et al., 2008)

Para poder observar más la estructura del almidón de maíz, se sugiere un esquema (figura 12), donde son observadas las zonas cristalinas y las zonas amorfas, las

lamelas y las cadenas de amilosa-amilopectina, así como las dobles hélices que se encuentran en este gránulo (Chavez-Villegas et al., 2024).

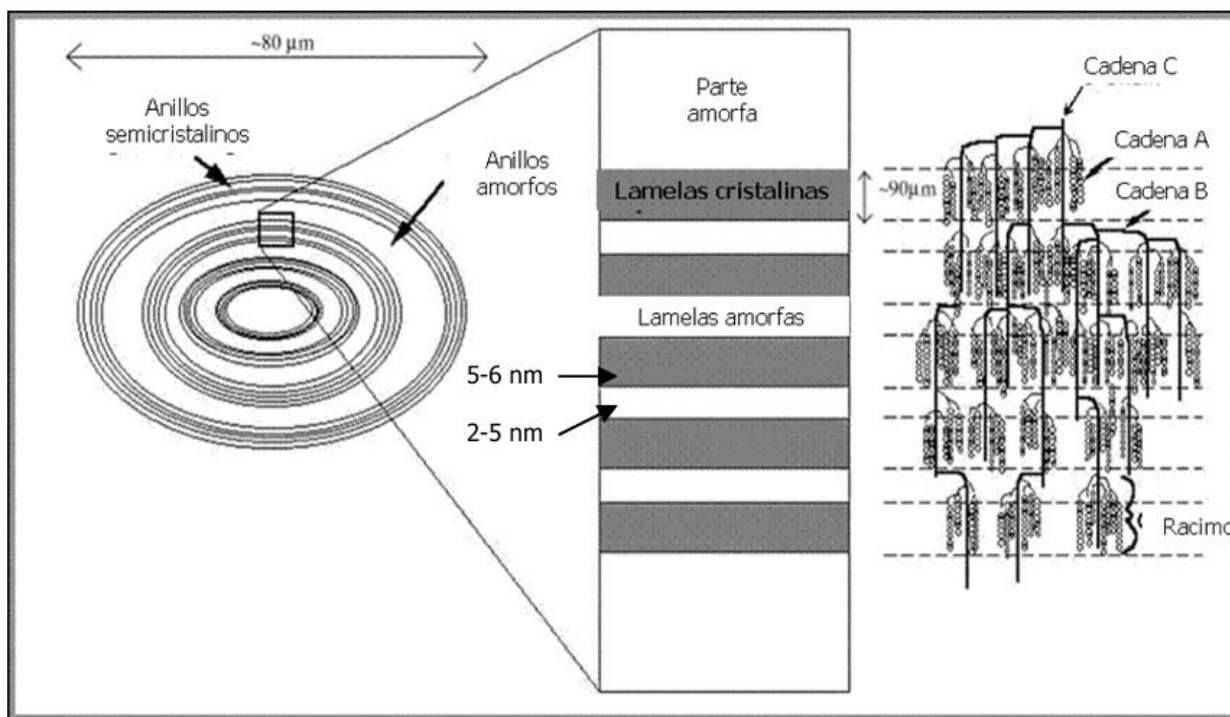


Figura 2. 12. Modelo de la estructura del almidón de acuerdo con Jenkins(Bello-Pérez et al., 1998)

Los diferentes niveles estructurales del gránulo de almidón, consta de anillos alternos con regiones consideradas amorfas y cristalinas. En estos anillos la región cristalina está formada por amilopectina que la estructura de los anillos amorfos está compuesta por amilosa y amilopectina. Ambos están formados por lamelas alternas cristalinas y amorfas, las dobles hélices que presenta y los bloques de construcción (figura 2.13)(Chavez-Villegas et al., 2024)

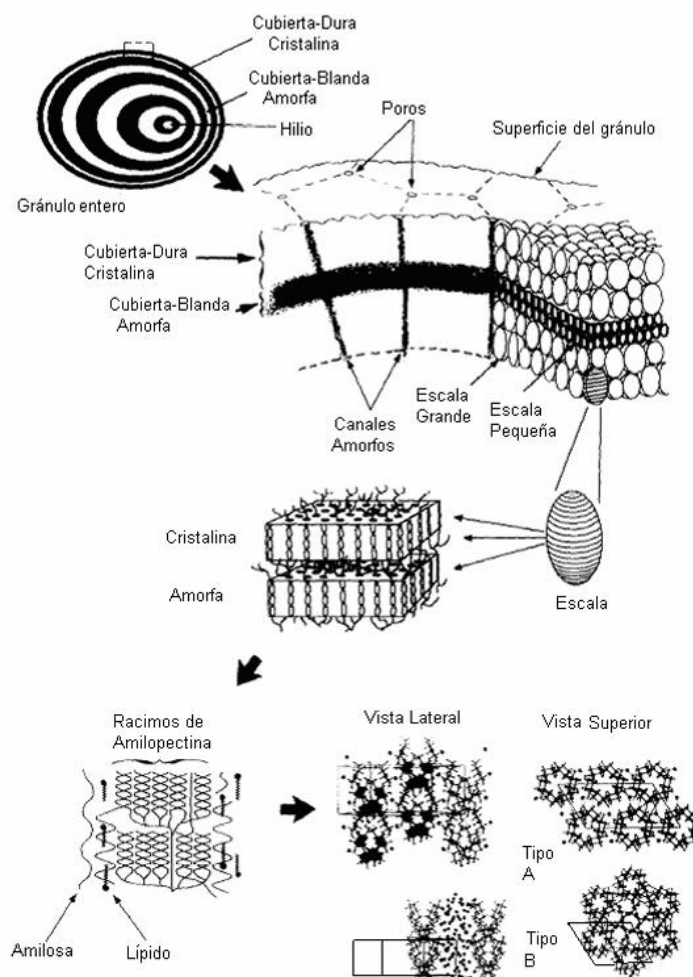


Figura 2.13 Estructura del gránulo de almidón a diferentes niveles de organización (Bello-Pérez et al., 1998).

2.7. Modificaciones del almidón de maíz.

El almidón nativo suele tener una baja estabilidad y, por lo general, no es adecuado para aplicaciones industriales directas. Por ello, es necesario modificarlo para ampliar sus usos en la industria. La modificación puede ser química o física, siendo el almidón modificado físicamente una opción que no implica el uso de reactivos químicos perjudiciales para el medio ambiente. En contraste, el almidón modificado químicamente requiere la adición de agentes y reactivos químicos, que pueden generar residuos que deben ser gestionados adecuadamente para minimizar su impacto ambiental.

2.7.1 Físicas

Las modificaciones físicas del almidón de maíz son procesos que alteran su estructura y propiedades sin cambiar su composición química. Estas modificaciones se emplean para optimizar la funcionalidad del almidón en una variedad de aplicaciones. Las modificaciones físicas originan cambios en la estructura y morfología del almidón, lo que afecta su solubilidad, gelatinización la capacidad de hinchamiento y la retrogradación. Estas modificaciones se pueden subclasificar en térmicas, como los tratamientos con microondas y no térmicas, como el uso de agua activada (Chavez-Villegas et al., 2024).

2.7.1.1 Modificaciones térmicas

2.7.1.1.1 Microondas

El calentamiento por microondas se fundamenta principalmente en el efecto de calentamiento dieléctrico que éstas generan. En una solución de almidón, este efecto surge de la incapacidad de las moléculas polares de agua para adaptarse instantáneamente a los cambios en la dirección del campo magnético. Como resultado, la energía térmica se produce únicamente a través de fricción y colisiones entre las moléculas. Este proceso provoca un aumento en la temperatura de los gránulos de almidón, lo que a su vez provoca cambios en su estructura y propiedades fisicoquímicas (Yi et al., 2024). El mecanismo de calentamiento por microondas implica la generación de calor mediante la fricción interna y las colisiones de las moléculas en el interior de los gránulos de almidón, así como un calentamiento superficial extensivo (Casasnovas & Anantheswaran, 2016). Esto permite que el almidón se caliente de manera relativamente rápida, a diferencia de los métodos de calentamiento por conducción o convección. Incluso con tiempos de calentamiento cortos (menos de 1 minuto), la radiación electromagnética puede inducir cambios significativos en la estructura y función del almidón (Tao et al., 2020).

Las microondas pueden provocar una serie de alteraciones, tanto directas como indirectas, en la morfología y propiedades fisicoquímicas de los gránulos de

almidón, las cuales están estrechamente relacionadas con las propiedades dieléctricas del sistema. Estas propiedades se refieren a la respuesta de las cargas vinculadas al campo eléctrico aplicado, lo que resulta ser un indicador crucial de la capacidad de los alimentos para absorber energía electromagnética y convertirla en energía térmica (Tao et al., 2020). La respuesta del almidón a las microondas, así como su habilidad para transformar esta energía en calor, determina la profundidad de penetración de las microondas en el mismo. Las propiedades dieléctricas del almidón dependen en gran medida de la cantidad de agua libre en la solución. Las moléculas de agua, que son dipolos típicos con una constante dieléctrica de aproximadamente 80.4, responden de manera significativa a los campos electromagnéticos (Yi et al., 2024). En emulsiones de almidón, la abundancia de agua libre y la buena fluidez de la muestra facilitan una respuesta intensa de las moléculas de agua al campo electromagnético. En este contexto, tanto la constante dieléctrica como el factor de pérdida dieléctrica del almidón aumentan notablemente con el incremento del contenido de humedad (Casasnovas & Anantheswaran, 2016).

2.7.1.2 Modificaciones no térmicas

2.7.1.2.1 Agua activada por plasma (AAP)

El AAP es una forma de agua química reactiva obtenida a través de un tratamiento de descarga de plasma, lo que le confiere la capacidad de adquirir especies activas específicas según diversos factores, como la fuente de plasma, el tiempo de tratamiento y los gases utilizados. Este proceso genera especies reactivas de oxígeno y nitrógeno, como H_2O_2 , O_3 , NO_2^- y NO_3^- O_3 , siendo el uso de aire como gas de descarga particularmente eficaz. Como resultado, el AAP presenta un carácter ácido, un alto potencial de oxidación-reducción y buena conductividad a un costo relativamente bajo (Flores-Silva et al., 2023).

Recientemente, el AAP ha sido utilizado para descontaminación de alimentos, eliminación de microorganismos, mejora en la germinación de semillas y desinfección de equipos médicos. Además, se ve como una alternativa prometedora para potenciar otros tratamientos físicos, como los hidrotermales y la extrusión, en

relación con las propiedades fisicoquímicas, de digestibilidad y estructurales del almidón, lo que resulta relevante para la industria alimentaria. No obstante, el grado de modificación del almidón dependerá de las características específicas del AAP, que son influenciadas por el tipo de gas, la potencia, el tiempo de activación y la ubicación de la descarga del plasma (Sifuentes-Nieves et al., 2024).

Capítulo 3. Materiales y métodos

3.1. Materiales

Se utilizó almidón de maíz normal (N) (CAS, Sigma Aldrich, Alemania), almidón de maíz ceroso (W) (99% amylopectin-WS), almidón alto en amilosa (HA) (Hylon VII, 70% amylose-HAS). Agua destilada marca Fremont.

3.2. Métodos

3.2.1 Obtención de agua activada por plasma (AAP)

El agua activada por plasma se generó mediante el tratamiento de agua destilada con plasma a presión atmosférica (APPJ), que incluye una fuente de alimentación (BK PRECISION 9104), el plasma y un suministro de gas. Para la activación, se colocaron 1000 ml de agua en un recipiente cilíndrico, y se insertó una sonda de plasma (5 mm) a 1 cm por debajo de la superficie del agua (Figura 3.14). El aire se utilizó como gas de trabajo, aplicando una potencia de reacción de 60 V durante 30 minutos. Las propiedades fisicoquímicas del AAP y del agua destilada se evaluaron midiendo su pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, utilizando un potenciómetro-conductímetro (B090102 Máquina de prueba de calidad de agua portátil Medidor de TDS y pH para agua 4 en 1). El AAP se utilizó inmediatamente para realizar la modificación por microondas (Flores-Silva et al., 2023).

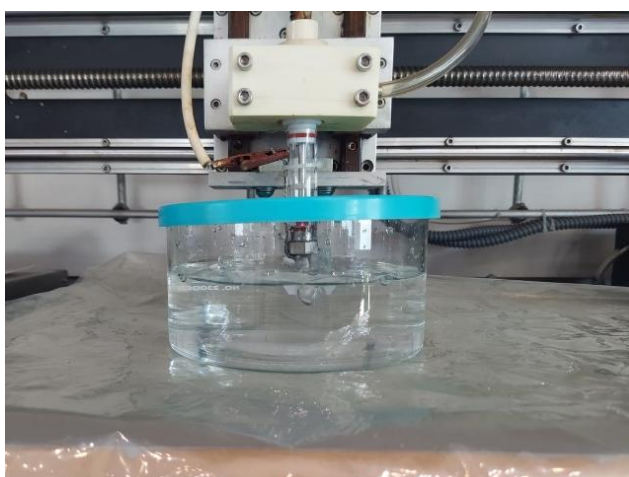


Figura 3.14. Obtención de agua activada por plasma (creación propia Acosta, 2024)

3.2.2 Tratamiento por microondas

Para el tratamiento con microondas, se mezclaron 3g de almidón de maíz (normal, alto en amilosa, ceroso), y 10 ml de agua destilada en viales para microondas y se dejaron reposar durante 24hrs. Posteriormente las muestras se trataron a 50 °C y 800 rpm durante 8 minutos en un microondas Monowave 300 de la empresa Anton Paar. Al finalizar este tiempo, las muestras se dejaron precipitar por 24h y se decantaron (Figura 3.15). Finalmente, los almidones modificados por microondas se secaron en una estufa a 60 °C durante 48 horas y se identificaron como NMW, HAMW y WMW (Jiang et al., 2023).

Los almidones del tratamiento dual se sometieron al mismo proceso, sin embargo, se sustituyó el agua destilada por AAP. Estos almidones fueron identificados como NMW-PAW, HAMW-PAW y WMW-PAW.

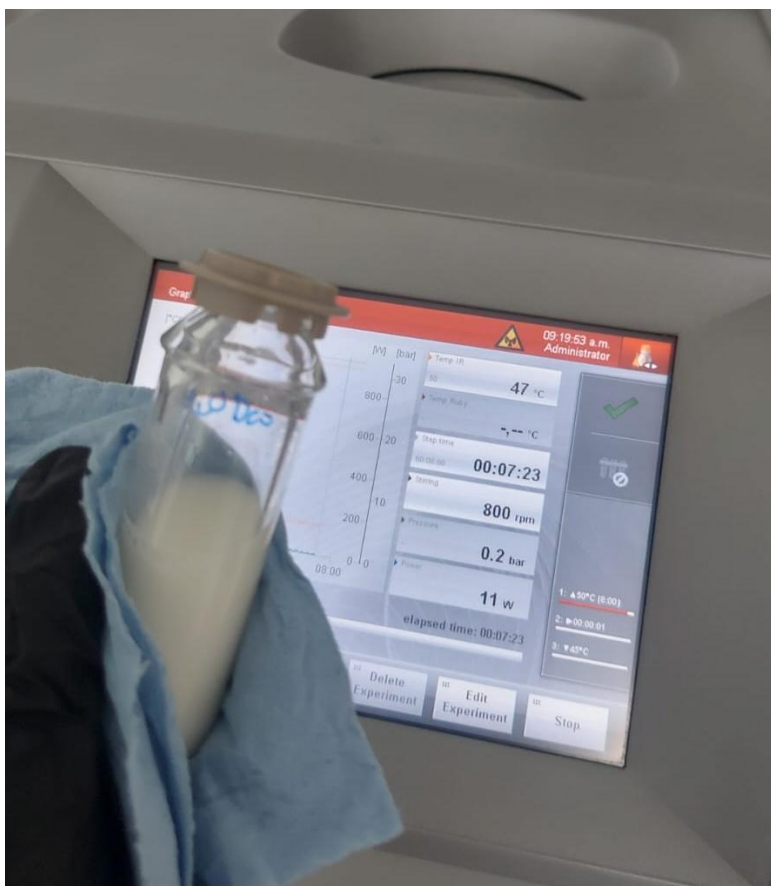


Figura 3.15. Tratamiento de microondas (creación propia Acosta, 2024)

3.2.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La morfología granular de las muestras de almidón, nativo y modificado, se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando un microscopio JOEL JCM6000 operando a 5k. Los gránulos de almidón se fijaron sobre un soporte con cinta adhesiva de cobre, y posteriormente se recubrieron con una capa conductora de oro-paladio durante 90 segundos en condiciones de vacío (Flores-Silva et al., 2023). Las imágenes de las muestras de almidón se capturaron con aumentos de 1000x y 1500x (Jiang et al., 2023)

3.2.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Con el objetivo de detectar los grupos químicos presentes en las muestras se realizó espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier acoplada a reflectancia total atenuada (FTIR-ATR). Se utilizó un espectrómetro Nicolet Magna 550 FTIR, en un intervalo de longitud de 4000 a 400 cm^{-1} . Para investigar la estructura helicoidal del almidón, se analizó la densidad espectral de las muestras mediante una técnica de deconvolución gaussiana, enfocándose en ciertas áreas del espectro (como las bandas de 1047/1022 y 995/1022 cm^{-1}) (Sifuentes-Nieves, Yáñez Macías, et al., 2021). Este proceso permitió confirmar la disposición helicoidal del almidón (Flores-Silva et al., 2023).

3.2.5 Difracción de rayos X (DRX)

Los patrones de difracción de rayos X de las muestras de almidón se registraron a 25°C, en un rango angular de 5° a 40°, con un paso de 0,05° cada 15 segundos. El análisis se realizó utilizando un difractómetro D8 Advance ECO (Bruker, EE. UU.), que empleó radiación $\text{CuK}\alpha$ a 1λ . El equipo estuvo conectado a una fuente de alimentación de 40 kV y 25 mA, lo que permitió obtener los patrones de difracción necesarios para la caracterización detallada de las muestras (Flores-Silva et al., 2023).

3.2.6 Calorimetría diferencial del barrido (DSC)

Las transiciones térmicas del almidón se analizaron utilizando un calorímetro diferencial de barrido (DSC 1 STARE System, MettlerToledo Inc., Suiza). Se prepararon muestras de 3 mg de almidón, que se colocaron en bandejas de aluminio específicas para el DSC. A cada muestra colocaron 7 μ L de agua desionizada, las bandejas se sellaron. Las muestras se sometieron a un ciclo de calentamiento en el calorímetro, a un rango de temperaturas de 20 a 100°C, con una velocidad de 10°C/min. Las temperaturas de inicio (T_o), pico (T_p), final (T_f) y la entalpía de la transición (ΔH) fueron obtenidas mediante el software del equipo (STARE, versión 9.30).

3.2.7 Análisis termogravimétrico (TGA)

Se realiza para estudiar cómo se comporta frente a los cambios de temperatura. Esto proporciona información clave sobre su estabilidad térmica, contenido de humedad y composición para esto se pesaron muestras de almidón nativo y modificado (10 mg) en platos de platino y se sometieron a un análisis térmico en un rango de temperaturas de 30 a 600°C. El calentamiento constante se llevó a cabo a de 10°C/min, con un flujo constante de nitrógeno controlado a 60 mL/min, utilizando un analizador térmico TGA Q500 (TA Instruments, New Castle, PA, EE. UU.). El cálculo del porcentaje de pérdida de peso durante el análisis se realizó mediante el software TA Instruments Universal Analysis 2000, proporcionando datos detallados sobre el comportamiento térmico de las muestras

3.2.8 Índice de solubilidad en agua (WSI), poder de hinchamiento (SP) y capacidad de retención de agua (WHC).

El método de esta técnica fue de acuerdo con lo antes establecido (Flores-Silva et al., 2023). Se prepararon suspensiones de almidones en agua destilada 1:20 p/v, las cuales fueron calentadas a 90 °C durante 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, las suspensiones se enfriaron rápidamente en un baño de agua helada (5 minutos) y luego se centrifugaron a 6000 rpm por 30 minutos utilizando una centrífuga Eppendorf® 5804 R. Se separó el sobrenadante, que fue secado en un

horno a 110 °C durante 12 horas al transcurrir el tiempo, se pesa el sedimento obtenido. El cálculo del SP y WSI se realizó con base en las ecuaciones correspondientes son:

$$SP = \left[\frac{\text{peso del sedimento}}{\text{peso de la muestra}} (100 - WSI) \right] * 100$$

Ecuación 1 Poder de hinchamiento (Flores-Silva et al., 2023)

$$WSI = \left[\frac{\text{peso del sobrenadante seco}}{\text{Peso de la muestra}} \right] * 100$$

Ecuación 2 índice de solubilidad (Flores-Silva et al., 2023)

Para la determinación de la WHC, se prepararon suspensiones de almidones y agua (1:20 p/v), que se agitaron en un vortex a 2000 rpm durante 1 minuto y se centrifugaron a 440 rpm por 10 minutos. El sedimento obtenido se utilizó para calcular con la siguiente ecuación.

$$WHC = \left[\frac{\text{peso del sedimento} - \text{peso de la muestra}}{\text{peso de la muestra}} \right] * 100$$

Ecuación 3 Capacidad de retención de agua (Flores-Silva et al., 2023)

Capítulo 4. Resultados y discusiones

4.1 Propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma (AAP)

Se analizaron las características fisicoquímicas del AAP para verificar los cambios en el agua después del tratamiento con plasma y después de un tiempo de contacto de 30min (tabla 4.3). En comparación con el agua destilada (marca Fremont), el tratamiento con plasma redujo el pH del AAP (5.21 a 2.58), a la vez que se observó un aumento en la conductividad eléctrica (42 a 353 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en los sólidos disueltos (18 a 176 ppm), lo que confirma la acidez del agua y la presencia de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (Chavez-Villegas et al., 2024)(Flores-Silva et al., 2023).

Tabla 4.3 Propiedades fisicoquímicas del agua destilada después de estar en contacto con el plasma (creación propia Acosta,2024)

Agua	pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Sólidos disueltos (ppm)
Agua destilada	5.21	42	18
AAP	2.58	353	176

4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

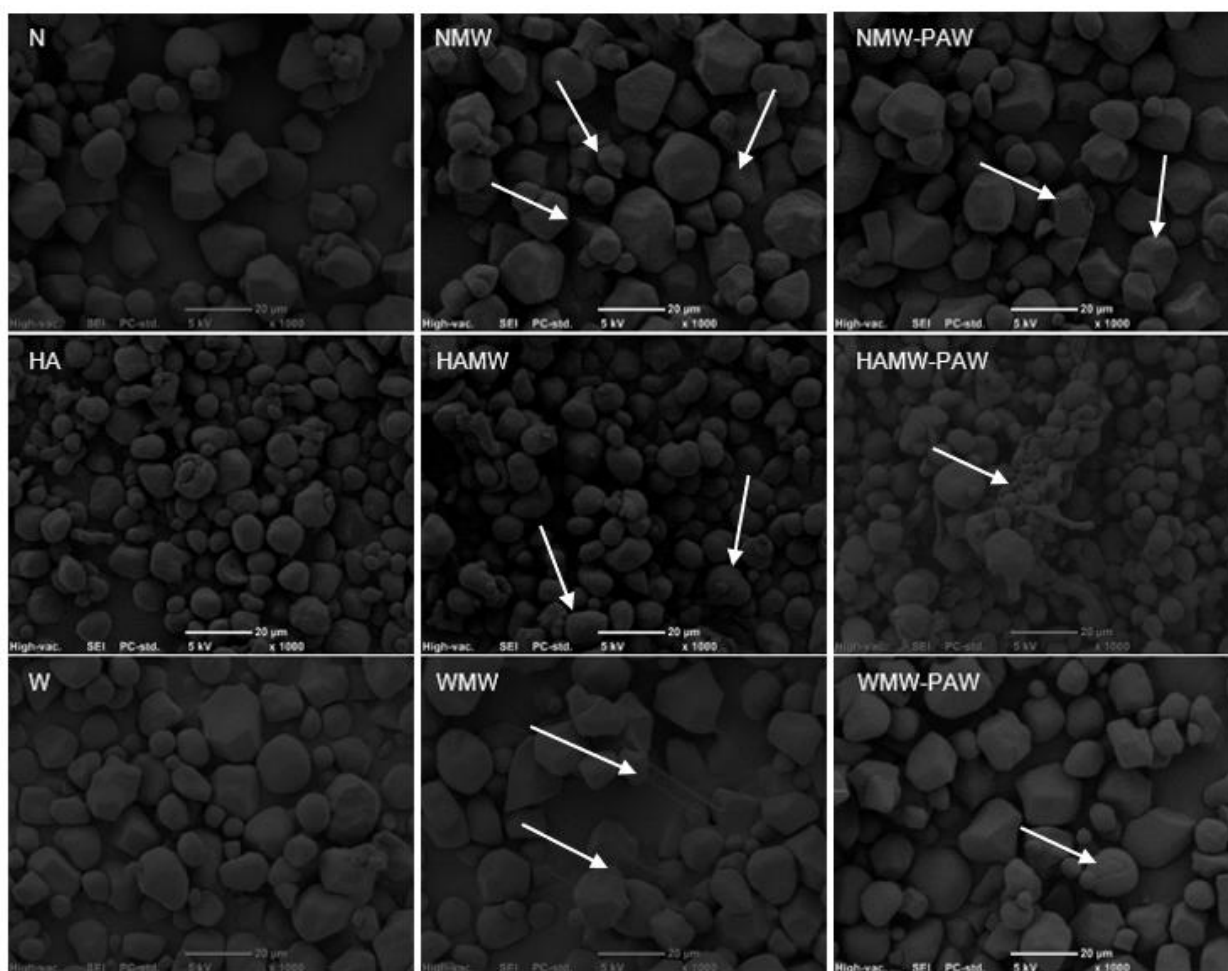
La morfología de los gránulos de almidón de maíz nativo normal (N), alto en amilosa (HA) y ceroso (W), los modificados por microondas (NMW, HAMW, WMW) y con el tratamiento dual (NMW-PAW, HAMW-PAW, WMW-PAW) se muestran en la Figura 4.16. Se observa que los almidones nativos presentan la morfología característica de cada uno de ellos. El almidón normal poligonales, el ceroso y el alto en amilosa elipsoidales (Obadi et al., 2023).

El tratamiento por microondas originó cambios en diferente grado en los almidones tratados, promoviendo porosidades y formas irregulares (Flores-Silva et al., 2023). La muestra NMW no mostró cambios en la morfología, pero sí reducción de tamaño de los gránulos; mientras que los gránulos HAMW presentaron porosidades. El

mayor efecto por el tratamiento con microondas se encontró en WMW, dónde se observaron gránulos que intentaban juntarse mediante puentes. Sin embargo, se requieren más estudios para definir si los gránulos se estaban fusionando en gránulos más grandes o separando.

El tratamiento dual (microondas y APP) promovió la formación de porosidades en NMW-PAW, el aglomeramiento de los gránulos de HAMW-PAW y la formación de grietas en WMW-PAW.

Estos cambios en la morfología indican que el tratamiento por microondas y las especies reactivas del AAP modificaron la superficie de los gránulos, pudiendo haber afectado también sus propiedades estructurales y funcionales.



4.16. Imágenes de MEB de almidones de maíz nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)

4.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

En la Figura 4.17 se muestran los espectros de los almidones nativos y modificados obtenidos por FT-IR. En todas las muestras se observan las bandas características del almidón en las regiones de 3300 cm^{-1} (vibraciones del grupo -OH), 2939 cm^{-1} (estiramiento C-H), 1150 cm^{-1} (enlace C-O), 1077 cm^{-1} (vibraciones C-O-H) y 900 cm^{-1} (estiramiento C-O), lo que indica que no hubo cambios significativos en los grupos funcionales de la molécula (Chavez-Villegas et al., 2024).

Además, la región de 1100 a 990 cm^{-1} se relaciona con la cristalinidad de corto alcance del almidón, donde los picos en 1047 , 1022 y 995 cm^{-1} se asocian con las zonas cristalinas, amorfas e hidratadas de la molécula del almidón (Flores-Silva et al., 2023). Dichos picos fueron deconvolucionados (Figura 4.18) para posteriormente calcular las relaciones $1047/1022$ y $995/1022$ asociadas al orden helicoidal y el grado de dobles hélices inducidos por el tratamiento (Tabla 4.4) (Sevenou et al., 2002).

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede observar que la relación $1047/1022$ que se asocia con el orden helicoidal en general disminuyó en todos los almidones tratados, lo cual indica que el tratamiento de microondas y el tratamiento dual desorganizaron la estructura del almidón. Este comportamiento sugiere que las especies reactivas del plasma disociaron algunos enlaces de hidrógeno que componen las dobles hélices de la amilopectina (Pérez & Bertoft, 2010)(Chavez-Villegas et al., 2024).

Por el contrario, la relación $995/1022$ incrementó en los almidones normales sometidos a ambos tratamientos (NMW, NMW-PAW), y disminuyó en el almidón alto en amilosa (HAMW, HAMW-PAW) y en el ceroso (WMW-PAW). El aumento en la relación de hélices también podría atribuirse a la desorganización de las cadenas ramificadas (amilopectina) y lineales (amilosa) durante el tratamiento, la amilosa libre se reorienta y se alinara desde una transición de espiral a hélices, lo que promovió una mayor asociación de las zonas cristalinas y amorfas en el almidón (Chavez-Villegas et al., 2024).

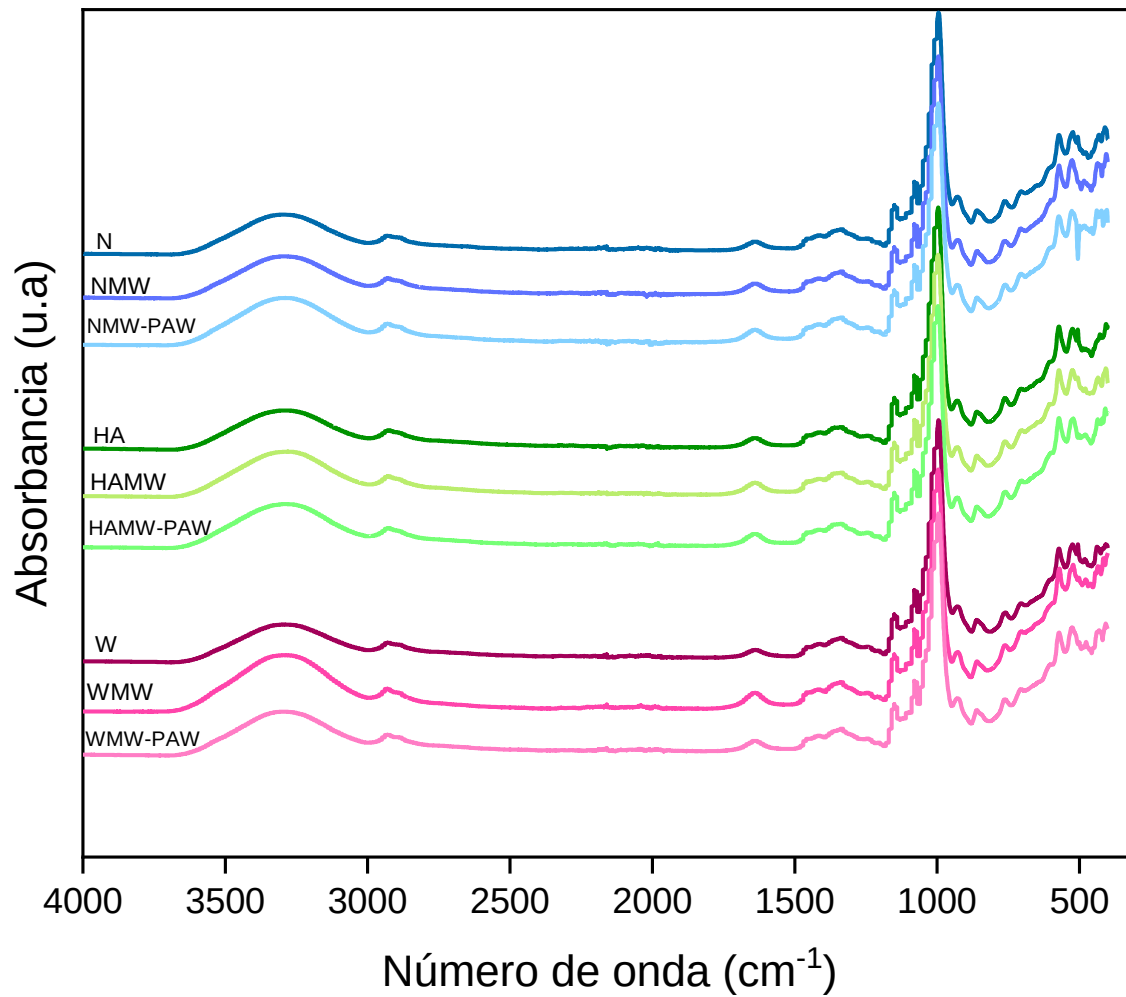


Figura 4.17. Espectro FT-IR (creación propia Acosta, 2024)

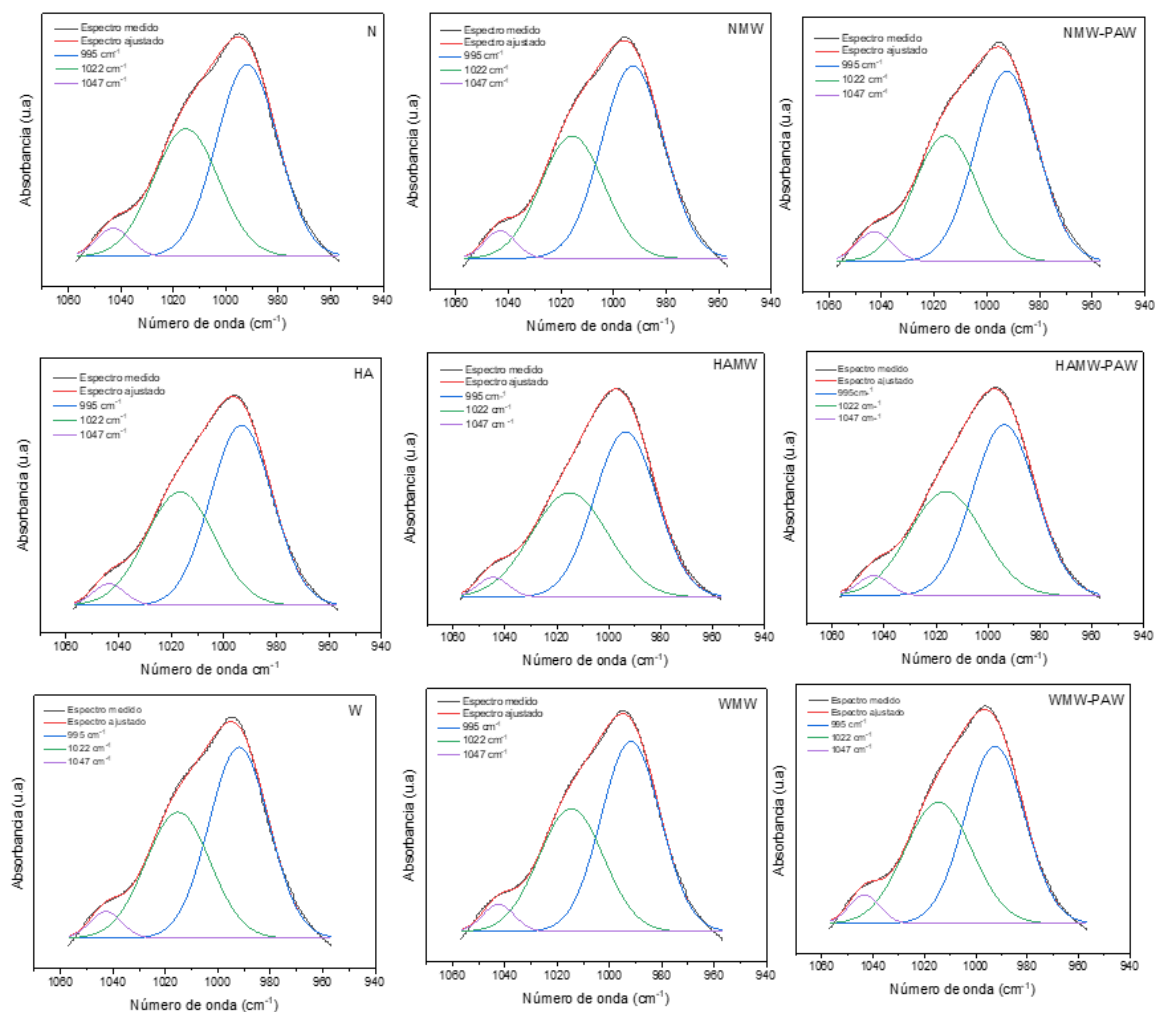


Figura 4.18. Deconvoluciones (creación propia Acosta, 2024)

Tabla 4.4 Relación 1047-1022, 995-1022 (creación propia Acosta, 2024)

Muestra	1047/1022	995/1022
N	0.11	1.41
NMW	0.11	1.53
NMW-PAW	0.13	1.48
HA	0.09	1.43
HAMW	0.07	1.29
HAMW-PAW	0.08	1.42
W	0.10	1.41
WMW	0.11	1.41
WMW-PAW	0.10	1.30

4.4. Difracción de Rayos X (DRX)

Los picos en los difractogramas se relacionan con la estructura cristalina de los almidones. Cada tipo de almidón tiene patrones de difracción específicos que reflejan su grado de cristalinidad y organización molecular. El almidón normal y ceroso muestra un patrón de difracción tipo A lo que generalmente sugiere una mayor capacidad de formación de gel, mientras que el alto en amilosa presenta un patrón de difracción tipo B en donde la amilosa tiene un papel muy importante ya que tiende a formar geles más firmes y menos viscoso (Flores-Silva et al., 2023).

En la figura 4.19 se observa que los almidones nativos normal y ceroso mostraron los picos característicos a 15, 16, 17, 19 y 22°. Después de los tratamientos, solamente WMW-PAW mostró cambios en el patrón de difracción, lo que indica que las especies en el agua activada modificaron la organización molecular del almidón ceroso. El almidón alto en amilosa presentó los picos correspondientes al patrón de difracción tipo B a 14, 17, 20, 22 y 24°. No se observaron cambios en el patrón después del tratamiento por microondas o dual. para saber esto se comparará el porcentaje de cristalinidad.

El grado de cristalinidad de las muestras se presenta en la Figura 4.19. Los almidones nativos presentaron un porcentaje de cristalinidad de 16.95, 11.97 y 17.92 para N, HA y W, respectivamente. Después del tratamiento de MW este porcentaje incrementó en los tres almidones NMW (17.07), HAMW (13.49), WMW (18.17), lo que podría indicar que hay un incremento en la proporción de la estructura ordenada del almidón debido a cambios en sus enlaces moleculares, específicamente en la alineación y organización de las cadenas de amilosa y amilopectina.

Por otro lado, las muestras sometidas al tratamiento dual mostraron una disminución del porcentaje de cristalinidad. La mayor disminución se observó en WMW-PAW (17.92 a 7.31) lo que indica que el tratamiento dual impactó en su estructura cristalina, permitiendo mayor exposición al AAP que alteró los cristalitos y el orden

helicoidal, generando un reordenamiento en una conformación altamente amorfa (Chavez-Villegas et al., 2024).

Los tratamientos térmicos y duales muestran un impacto significativo en el grado de cristalinidad, donde el tratamiento con microondas genera un aumento en la cristalinidad, lo que podría asociarse a una mayor estabilidad térmica del almidón, mientras que el tratamiento dual disminuye drásticamente el porcentaje de cristalinidad, favoreciendo una estructura más amorfa (Chavez-Villegas et al., 2024). Estos cambios estructurales sugieren que los tratamientos afectan la organización molecular del almidón, particularmente su orden helicoidal, promoviendo reordenamientos que podrían influir en sus propiedades funcionales, lo cual requiere análisis complementarios como TGA para confirmar los efectos sobre su estabilidad térmica.

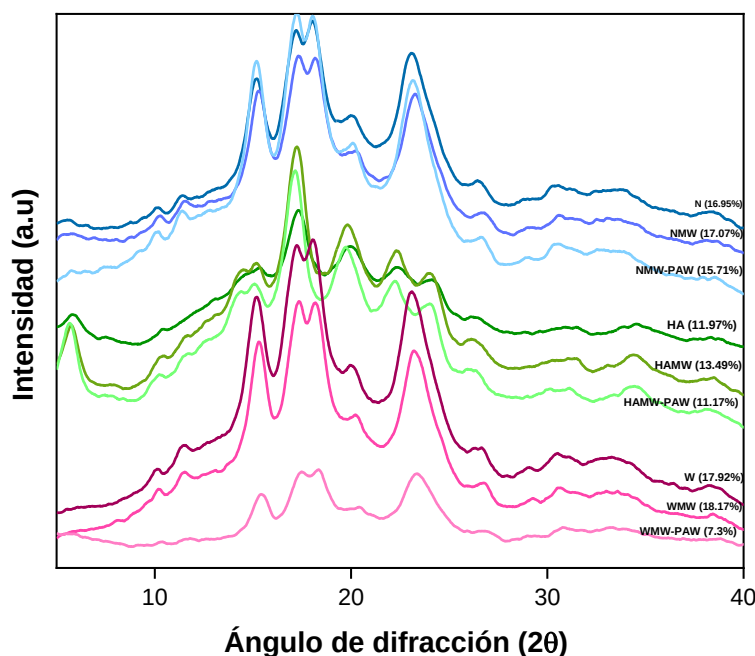


Figura 4.19. Espectro de DRX almidones nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)

4.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La figura 2.5 muestra las transiciones térmicas de los almidones nativos y modificados. Se observa que no se presentaron cambios significantes en las temperaturas de inicio (T_0), pico (T_p) y final (T_f) de todos los almidones. Sin embargo, los almidones NMW, HAMW, WMW presentan un rango de gelatinización más amplio (ΔT mayor), lo que indica una mayor variabilidad térmica en la transición de estado.

Respecto a la entalpía (ΔH); indicador de la energía absorbida durante la gelatinización, los almidones NMW-PAW, HAMW y WMW presentan una mayor entalpía en comparación con los demás, lo que sugiere una mayor capacidad para almacenar energía interna durante la gelatinización promoviendo la formación de cristalitas más homogéneos como anteriormente se había reportado, lo que nos sugiere que los tratamiento modifican de diferente forma los almidones evaluados, lo cual puede atribuirse al contenido de amilosa y la organización de las cadenas que es diferente entre almidones (Sifuentes-Nieves, Mendez-Montealvo, et al., 2021).

Tabla 4.5 Transiciones térmicas de almidones nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)

Nombre	T_0 (°C)	T_p (°C)	T_f (°C)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)
N	66.81	71.40	79.39	12.58	1.81
NMW	67.03	70.75	78.08	11.05	1.72
NMW-PAW	66.80	70.52	77.77	10.97	2.37
HA	52.84	73.12	89.16	36.68	3.57
HAMW	52.72	73.28	89.94	37.22	3.81
HAMW-PAW	55.22	62.76	66.52	11.3°C	0.21
W	69.35	73.04	78.07	8.72°C	0.79
WMW	68.54	72.24	80.95	12.41°C	2.21
WMW-PAW	69.15	72.32	78.97	10.8°C	1.47

4.6 Análisis de termogravimetría (TGA)

El análisis TGA mide la pérdida de peso de un material en función de la temperatura, lo que permite estudiar las propiedades térmicas y la estabilidad del material. Los termogramas de los almidones nativos, modificados por microondas (NMW, HAMW, WMW,) y sometidos al tratamiento dual (NMW-PAW, HAMW-PAW, WMW-PAW) se muestran en la figura 4.20.

Todos los almidones (nativos y modificados) presentaron una pérdida de peso en dos etapas. La primera pérdida, a menos de 120 °C, está relacionada con la evaporación del agua presente. Se observaron ligeras modificaciones en el porcentaje de agua evaporada, lo que sugiere una alteración de las moléculas del agua por los tratamientos. Posiblemente el tratamiento con microondas o dual hubo una modificación de su estructura elipsoidal.

La segunda pérdida de peso, a 250 °C esta atribuida a la estabilidad del almidón. En los almidones normales (Figura 4.20a) y cerosos (Figura 4.20c) tratados se observa una disminución en la temperatura debido a la reorganización de las cadenas de amilopectina. El hecho de que los almidones modificados presenten el mismo comportamiento sugiere que el tratamiento por microondas es el responsable de estos cambios debido a que con la modificación por el calentamiento al que se somete. Un comportamiento opuesto se observó en los almidones altos en amilosa (HA) dónde no se vieron cambios en la estabilidad térmica de los almidones modificados. Esto sugiere que la estructura del almidón alto en amilosa se mantuvo estable, aún después de los tratamientos.

Las diferencias en la pérdida de peso entre las variaciones de almidón sugieren que los tratamientos aplicados afectan la estabilidad térmica. Los almidones NHW, HAMW, WMW presentan características mejoradas en comparación con los almidones no modificados lo que podremos observar con una prueba de su capacidad de retención de agua y en su comportamiento térmico, lo cual se evaluará con pruebas de hinchamiento, retención y solubilidad (Ali et. al 2023).

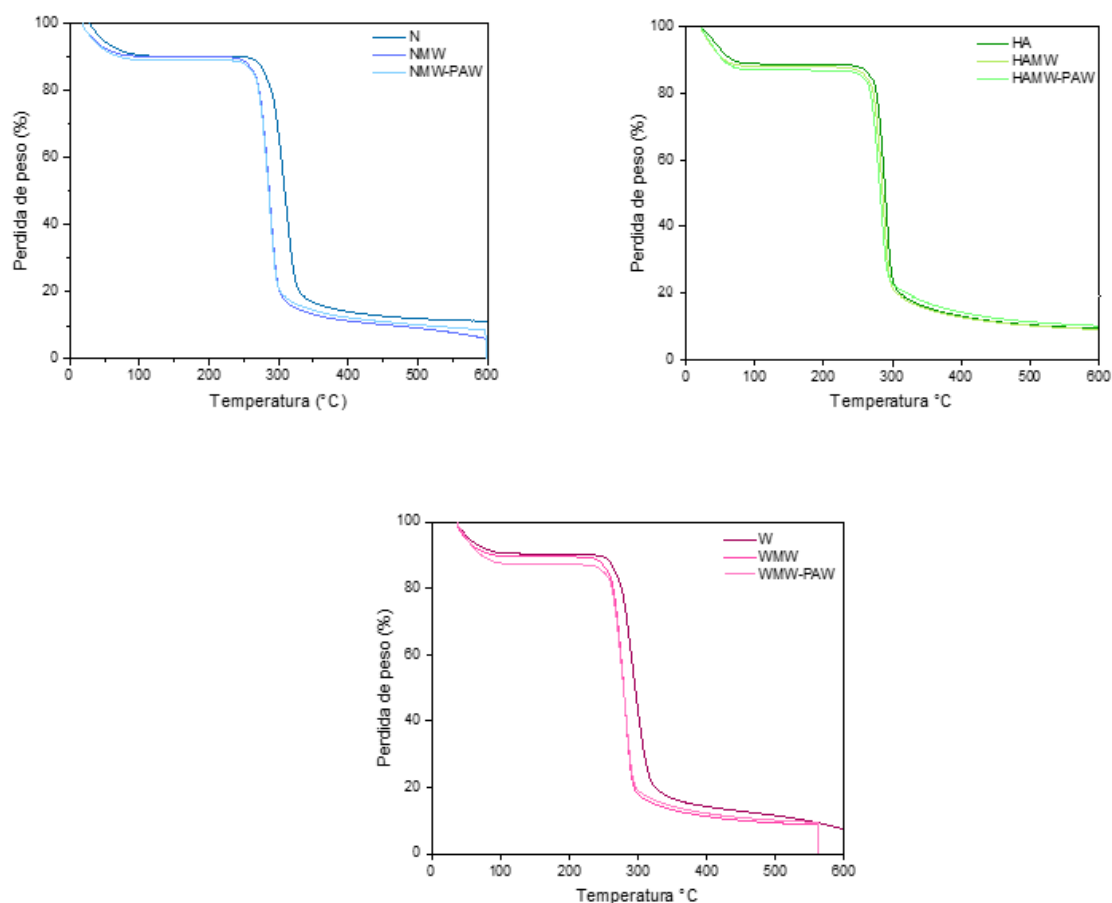


Figura 4.20. Analisis TGA de almidones nativos y modificados (creación propia Acosta, 2024)

4.7 Índice de solubilidad en agua (WSI), poder de hinchamiento (SP) y capacidad de retención de agua (WHC).

Los resultados del índice de solubilidad en agua (WSI) de las muestras N, HA, W, modificadas con microondas (NMW, HAMW, WMW) y con tratamiento dual (NMW-PAW, HAMW-PAW, WMW-PAW) se presentan en la Figura 4.21 (a, b o c). Los almidones nativos presentaron un menor WSI que los modificados por tratamiento dual. El aumento del WSI observado en las muestras como WMW y HAMW-PAW se debe a una mayor desorganización de las hélices dobles y las cadenas de amilopectina, lo que facilita la lixiviación de las moléculas solubles en agua. En

contraste, almidones como NMW, con menor WSI, retienen su estabilidad estructural, siendo más adecuados para productos que demandan estabilidad durante la cocción y el almacenamiento (Israel, Sifuentes).

El SP alto en muestras como NMW, WMW y HAMW indica que estos almidones tienen una estructura interna más permeable al agua, lo que permite una mayor expansión. Esto sugiere que el tratamiento con microondas genera regiones más amorfas, que son más propensas a la hidratación y el hinchamiento. Por otro lado, el menor SP en muestras tratadas con el método dual (HAMW-PAW y NMW-PAW) refleja una reducción en su capacidad para expandirse, probablemente debido a un mayor desorden inducido por las especies reactivas del plasma, lo que podría limitar la formación de texturas suaves o geles (Israel, Sifuentes).

WHC elevada en muestras como WMW y HAMW sugiere que las cadenas de amilopectina y amilosa reorganizadas durante el tratamiento facilitan la formación de las dobles hélices, las cuales facilitan o restringen el acceso al agua. Esto es esencial en alimentos como productos horneados, ya que ayuda a mantener la humedad y mejora su calidad sensorial. Las muestras con WHC intermedia, como HAMW-PAW, muestran un balance entre retención y funcionalidad, adecuado para aplicaciones que requieren un manejo controlado de la humedad (Israel Sifuentes).

Los almidones con alto SP también tienden a tener una buena WHC, lo cual es beneficioso en aplicaciones alimentarias que requieren humedad y textura. Sin embargo, un WSI excesivamente alto puede comprometer estas propiedades, dando lugar a productos demasiado húmedos o con textura inadecuada. Por lo tanto, los tratamientos térmicos y duales afectan significativamente las propiedades funcionales del almidón al modificar su estructura interna, lo que les permite adaptarse a diferentes aplicaciones alimentarias e industriales.

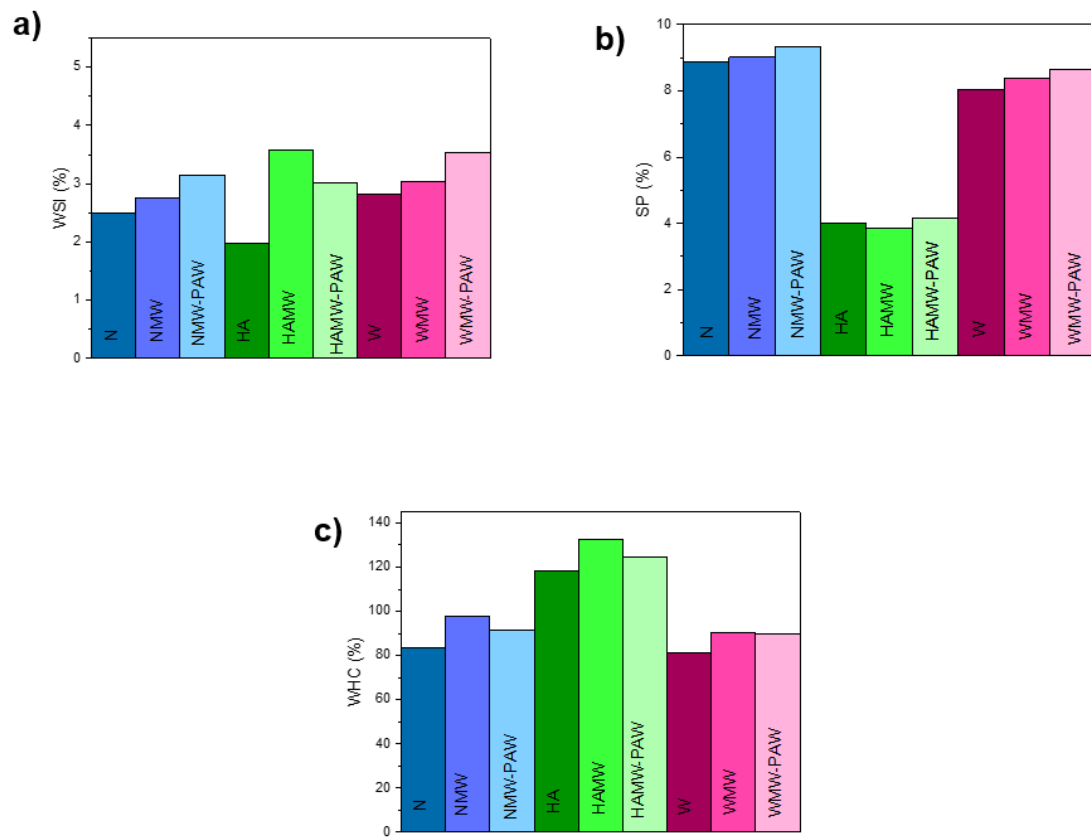


Figura 4. 21. Capacidad de retención de agua (WHC), índice de solubilidad en agua (WSI) y poder de hinchamiento (SP) de almidones de maíz (creación propia Acosta, 2024)

Conclusiones

El almidón de maíz es un biopolímero ampliamente utilizado debido a sus propiedades funcionales y su bajo costo, en su forma nativa presenta limitaciones en su estabilidad térmica, lo que ha impulsado el desarrollo de métodos de modificación. El uso de agua activada por plasma y el tratamiento por microondas han mostrado potencial para inducir cambios en la estructura del almidón. Estas modificaciones físicas pueden influir en sus propiedades estructurales, térmicas y funcionales, ampliando sus aplicaciones en distintos campos industriales.

El uso combinado de microondas (50 °C y 800 rpm durante 8 minutos) y agua activada por plasma (AAP) demostró ser una estrategia eficaz para transformar las propiedades estructurales, térmicas, fisicoquímicas y funcionales del almidón de maíz. Los hallazgos mostraron que este tratamiento mejoró aspectos esenciales como la solubilidad, la capacidad de retención de agua y la estabilidad térmica, mientras inducía cambios significativos en la organización molecular de los gránulos de almidón.

Particularmente, el tratamiento dual promovió la generación de estructuras más amorfas en comparación con los métodos individuales, lo que sugiere su idoneidad para aplicaciones industriales que demanden almidones con mayor capacidad de absorción y expansión en agua. No obstante, se observó que el impacto del tratamiento variaba dependiendo del tipo de almidón, reflejando diferencias en las respuestas del almidón normal, ceroso y alto en amilosa.

En conclusión, esta investigación destaca el potencial del tratamiento dual como una opción sostenible y efectiva para la modificación física del almidón, abriendo perspectivas para su aplicación en industrias como la alimentaria, los bioplásticos y los textiles. Es importante realizar estudios adicionales que profundicen en la relación entre estas transformaciones y su rendimiento en aplicaciones específicas, lo que fortalecería su factibilidad tanto comercial como ambiental.

Referencias bibliográficas

- Agama-Acevedo, E., Juárez-García, E., Evangelista-Lozano, S., Rosales-Reynoso, O. L., & Bello-Pérez, L. A. (n.d.). *CARACTERÍSTICAS DEL ALMIDÓN DE MAÍZ Y RELACIÓN CON LAS ENZIMAS DE SU BIOSÍNTESIS* *CHARACTERISTICS OF MAIZE STARCH AND RELATIONSHIP WITH ITS BIOSYNTHESIS ENZYMES*.
- Agraria, U., Habana, L., Rodríguez Pérez, F., Duarte, C., Guevara, C. E. ;, & Méndez, G. ; (n.d.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93213303>
- Bello-Pérez, L. A., Roger, P., & Colonna, P. (1998). Macromolecular Features of Starches Determined by Aqueous High-performance Size Exclusion Chromatography. In *Journal of Cereal Science* (Vol. 27).
- Blazek, J., & Gilbert, E. P. (2010). Effect of enzymatic hydrolysis on native starch granule structure. *Biomacromolecules*, 11(12), 3275–3289.
<https://doi.org/10.1021/bm101124t>
- Casasnovas, J., & Anantheswaran, R. C. (2016). Dynamic measurement of starch granule swelling during microwave heating. *Carbohydrate Polymers*, 151, 1052–1057. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.065>
- Chavez-Villegas, M., Flores-Silva, P. C., Hernandez-Hernandez, E., Bello-Pérez, L. A., Ceniceros-Reyes, M., Garcia-Hernandez, A., & Sifuentes-Nieves, I. (2024). In situ starch and water modification using atmospheric plasma: Structure, functionality and in vitro digestibility. *Food Bioscience*, 61.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104761>
- Flores-Silva, P. C., Ramírez-Vargas, E., Palma-Rodriguez, H., Neira-Velazquez, G., Hernandez-Hernandez, E., Mendez-Montealvo, G., & Sifuentes-Nieves, I. (2023). Impact of plasma-activated water on the supramolecular structure and functionality of small and large starch granules. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127083>
- Gelatinización del almidón: ¿qué es? - Blog de ciencia de los alimentos*. (n.d.). Retrieved November 26, 2024, from
<https://www.alimentos.zantgar.com/gelatinizacion-del-almidon-que-es/>
- Han, Z., Li, Y., Luo, D. H., Zhao, Q., Cheng, J. H., & Wang, J. H. (2021). Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment. *Food Chemistry*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129887>
- Huang, S., Chao, C., Yu, J., Copeland, L., & Wang, S. (2021). New insight into starch retrogradation: The effect of short-range molecular order in gelatinized

- starch. *Food Hydrocolloids*, 120.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106921>
- Jiang, K., Wang, W., Ma, Q., Wang, J., & Sun, J. (2023). Microwave-assisted enzymatic hydrolysis as a novel efficient way to prepare porous starch. *Carbohydrate Polymers*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120306>
- Obadi, M., Qi, Y., & Xu, B. (2023). High-amylose maize starch: Structure, properties, modifications and industrial applications. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 299). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120185>
- Pérez, S., & Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. In *Starch/Staerke* (Vol. 62, Issue 8, pp. 389–420). <https://doi.org/10.1002/star.201000013>
- Schober, T. J., Bean, S. R., Boyle, D. L., & Park, S. H. (2008). Improved viscoelastic zein-starch doughs for leavened gluten-free breads: Their rheology and microstructure. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.04.004>
- Sifuentes-Nieves, I., Mendez-Montevalvo, G., Flores-Silva, P. C., Nieto-Pérez, M., Neira-Velazquez, G., Rodriguez-Fernandez, O., Hernández-Hernández, E., & Velazquez, G. (2021). Dielectric barrier discharge and radio-frequency plasma effect on structural properties of starches with different amylose content. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102630>
- Sifuentes-Nieves, I., Soler, A., & Flores-Silva, P. C. (2024). Effect of plasma-activated water on the supramolecular structure and techno-functional properties of starch: A review. In *Food Chemistry* (Vol. 456). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139997>
- Sifuentes-Nieves, I., Yáñez Macías, R., Neira Velázquez, G., Velázquez, G., Garcia Hernandez, Z., Gonzalez Morones, P., & Hernández-Hernández, E. (2021). Biobased sustainable materials made from starch and plasma/ultrasound modified Agave fibers: Structural and water barrier performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 2374–2381. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.071>
- Sinhmar, A., Pathera, A. K., Sharma, S., Nehra, M., Thory, R., & Nain, V. (2023). Impact of Various Modification Methods on Physicochemical and Functional Properties of Starch: A Review. In *Starch/Staerke* (Vol. 75, Issues 1–2). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/star.202200117>
- Tao, Y., Yan, B., Fan, D., Zhang, N., Ma, S., Wang, L., Wu, Y., Wang, M., Zhao, J., & Zhang, H. (2020). Structural changes of starch subjected to microwave

- heating: A review from the perspective of dielectric properties. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 99, pp. 593–607). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.020>
- Vamadevan, V., & Bertoft, E. (2015). Structure-function relationships of starch components. In *Starch/Staerke* (Vol. 67, Issues 1–2, pp. 55–68). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/star.201400188>
- Yangcheng, H., Jiang, H., Blanco, M., & Jane, J. L. (2013). Characterization of normal and waxy corn starch for bioethanol production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(2), 379–386. <https://doi.org/10.1021/jf305100n>
- Yi, M., Tang, X., Liang, S., He, R., Huang, T., Lin, Q., & Zhang, R. (2024). Effect of microwave alone and microwave-assisted modification on the physicochemical properties of starch and its application in food. In *Food Chemistry* (Vol. 446). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138841>
- Zhao, K., Saleh, A. S. M., Li, B., Wu, H., Liu, Y., Zhang, G., & Li, W. (2018). Effects of conventional and microwave pretreatment acetylation on structural and physicochemical properties of wheat starch. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(11), 2515–2524. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13845>