



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**"EFECTO DE LA ADICIÓN DE GRASA ANIMAL EN LA
FORMACIÓN DE COMPLEJOS AMILOSA-LÍPIDOS EN MAÍZ
CACAHUACINTLE DURANTE LA ELABORACIÓN DE
POZOLE"**

TESIS INDIVIDUAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS**

PRESENTA

MARÍA FERNANDA DORANTES CAMPUZANO

DIRIGIDA POR

DRA. MARCELA GAYTAN MARTÍNEZ

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EFECTO DE LA ADICIÓN DE GRASA ANIMAL EN LA
FORMACIÓN DE COMPLEJOS AMILOSA-LÍPIDOS EN MAÍZ
CACAHUACINTLE DURANTE LA ELABORACIÓN DE
POZOLE”**

TESIS INDIVIDUAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS

PRESENTA

MARÍA FERNANDA DORANTES CAMPUZANO

DIRIGIDA POR

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

SINODALES

Dra. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ
DIRECTOR

Dra. NATALIA PALACIOS ROJAS
SINODAL

Dra. BRENDA LIDIA CONTRERAS JIMENEZ
SINODAL

Dra. ROCIO CAMPOS VEGA
SINODAL

Agradecimientos

A mis abuelos, que tomaron el papel de padres y a mi mamá les agradezco infinitamente su apoyo y cariño a lo largo de toda mi carrera universitaria, pero sobre todo en estos últimos semestres, gracias por la motivación que me han brindado, porque en los momentos en los que menos creí en mí decían las palabras adecuadas para que recordara cada una de mis metas y sueños. Gracias por siempre ser mi puerto seguro. A mi hermano, por inspirarme a esforzarme más. A mis tíos y primos, por siempre brindarme su apoyo incondicional durante toda mi carrera universitaria, porque no solo se preocupaban por mi estudio, sino también se preocupaban por mi bienestar fuera de la universidad.

A la Doctora Marcela, por brindarme la oportunidad de trabajar con ella y guiarme en este camino de la Tesis, porque gracias a una de sus clases tuve el interés de sumergirme en el camino de la investigación. No solo es una excelente investigadora, sino también es una excelente persona, que con sus consejos me impulsó siempre a ser mejor estudiante pero sobre todo mejor persona. Sin su apoyo este trabajo no hubiera visto la luz.

Agradezco a mi comité, por las revisiones y aportaciones hechas en la elaboración final de la Tesis. A mi alma mater la Universidad Autónoma de Querétaro, a mis profesores por compartir sus conocimientos durante mi desarrollo académico.

Agradezco al Centro de Investigación en Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada (CICATA), en especial al Dr. Morales y al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional, así como a la Universidad Autónoma de México Campus Juriquilla, en especial al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) por el apoyo brindado durante la realización del presente trabajo.

Agradezco al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, por las variedades mejoradas de maíz proporcionadas para realizar la Tesis.

A Ángel, por su apoyo durante el desarrollo del trabajo, porque siempre tenía un espacio para revisar mis resultados, resolver mis dudas y transmitirme un poco de su conocimiento.

A los chicos del Laboratorio de Nutracéuticos, que me recibieron con los brazos abiertos en su área de trabajo, en especial a Fer, Ely y Abril, por compartir buenos momentos acompañados de café y pan.

A mis amigos de la carrera, especialmente a Alma, Vale, Italia y Cris, que no solo compartieron cinco años de clases y estudio, sino que también compartieron cinco años de sus vidas conmigo, llenos de pláticas, llanto, consejos pero sobre todo llenos de risas y diversión.

A mi mejor amiga, Yaren, por apoyarme incondicionalmente en todo a pesar de la distancia. A Karen, Mich, Ángel, Erik que me apoyaron durante una gran parte del camino.

A mis roomies, Alo, Lupita, Fer, Tania, Charles, Fifi, Katya, en especial a Nana, Ale y Emma, por su apoyo y motivación durante el desarrollo de este trabajo, porque cuando tenía un mal día y llegaba a la casa siempre había alguien para escucharme y cambiar mi ánimo con una plática en la cocina, gracias por siempre acompañarme en mis logros y mis derrotas.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Maíz	1
1.1.1 Maíz Cacahuacintle	2
1.1.2 Elotes Occidentales	2
1.1.3 Pozole	3
1.2. Generalidades del almidón	4
1.2.1 Amilasa	5
1.2.2 Amilopectina	6
1.3 Estructura de los gránulos de almidón	8
1.3.1 Cristalinidad	8
1.4 Tratamientos térmicos del almidón	10
1.4.1 Gelatinización	10
1.4.2 Retrogradación	12
1.5 Nixtamalización	12
1.6 <i>Annealing</i>	14
1.7 Almidón resistente	15
1.7.1 Medición de almidón resistente	16
1.7.2 Tipos de almidón resistente	17
2. HIPÓTESIS	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 General	21

3.2 Específicos	21
4. METODOLOGÍA	22
4.1 Materiales y Reactivos	22
4.2 Composición química proximal	22
4.3 Fibra dietaria total, soluble e insoluble	22
4.4 Almidón total, almidón resistente, almidón disponible, amilosa y amilopectina.	23
4.5 Índice de flotación	23
4.6 Proceso de nixtamalización	23
4.7 Elaboración de pozole	23
4.8 Propiedades térmicas del maíz, maíz nixtamalizado y del pozole	24
4.9 Propiedades reológicas del maíz, maíz nixtamalizado y pozole	24
4.10 Propiedades morfológicas y estructurales del almidón nativo, almidón nixtamalizado y recocado	25
4.10.1 Microestructura y morfología del gránulo de almidón	25
4.10.2 Patrón de difracción de rayos X	25
4.10.3 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)	25
4.11 Análisis estadístico	26
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
6. CONCLUSIONES	71
7. REFERENCIAS	73

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Métodos de medición de almidón resistente	17
2 Índice de flotación de maíces pozoleros	27
3 Composición proximal de maíces pozoleros	29
4 Fibra dietaria de maíces pozoleros	31
5 Contenido de sólidos de Nejayote	32
6 Almidón disponible, almidón resistente y almidón total en muestras de maíces pozoleros	34
7 Propiedades térmicas de maíces pozoleros adicionados con diferentes cantidades de grasa	40
8 Propiedades térmicas de fusión de complejos amilosa lípidos tipo I de maíces pozoleros	44
9 Propiedades térmicas de fusión de complejos amilosa lípidos tipo II de maíces pozoleros	45
10 Parámetros reológicos en maíces pozoleros	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Esquema de biosíntesis de almidón. 1) Fosfoglucomutasa; 2) ADP-glucosa pirofosforilasa; 3) síntesis del almidón soluble; 4) enzimas de ramificación; 5) almidón fosforilasa; 6) amilasas, maltasas; 7) hexoquinasa (Buleón y col., 1998)	5
2 Cadenas presentes en la molécula de amilopectina. Adaptado de Pérez, 2010	7
3 Estructura de cristales de amilosa (Tester y col., 2004)	9
4 Almidón resistente en maíces pozoleros después del proceso de cocción adicionado con grasa animal	35
5 Perfil viscoamilográfico de maíces pozoleros con adición de grasa	49
6 Micrografías de maíces crudos y nixtamalizados. A: maíz Cacahuacintle; B: maíz Pozolero 1; C: maíz Pozolero 2; p: pericarpio; a: capa de aleuronas	54
7 Micrografías de maíces crudos, a: maíz Cacahuacintle; b: maíz Pozolero 1; c: maíz Pozolero 2	55
8 Micrografías (1200 X) de maíz Cacahuacintle con diferentes tratamientos, a: crudo; b: nixtamalizado; c: 0% grasa; d: 6% grasa; e: 8% grasa; f: 10% grasa	57
9 Micrografías (1200 X) de maíz Pozolero 1 con diferentes tratamientos, g: crudo; h: nixtamalizado; i: 0% grasa; j: 6% grasa; k: 8% grasa; l: 10% grasa	59
10 Micrografías (1200 X) de maíz Pozolero 2 con diferentes tratamientos, m: crudo; n: nixtamalizado; o: 0% grasa; p: 6% grasa; q: 8% grasa; r: 10% grasa	61
11 Patrones de rayos X de muestras crudas de maíces pozoleros. Las muestras nixtamalizadas son señaladas con líneas punteadas	62

12	Patrón de rayos X de muestras sometidas a cocción con grasa añadida; a)maíz Cacahuacintle; b) maíz Pozolero 1; c) maíz Pozolero 1	65
13	Espectro FTIR de muestras crudas y nixtamalizadas	68
14	Espectros FTIR de muestras sometidas a cocción con grasa añadida; a) maíz Cacahuacintle, b) maíz Pozolero 1, c) maíz Pozolero 2	70

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

El maíz es fundamental en la dieta mexicana, una de las formas de consumirlo es a través de una sopa tradicional conocida como pozole. La preparación del pozole inicia con la nixtamalización del maíz, que causa cambios en el gránulo de almidón. Después del proceso térmico alcalino, el grano nixtamalizado se somete a cocción nuevamente que, normalmente, es complementado con carne de cerdo. Se ha reportado que la cocción con grasa puede formar complejos amilosa-lípidos, también conocidos como almidón resistente V, que modifican las propiedades funcionales y nutricionales del almidón. El objetivo del presente trabajo fue determinar las propiedades térmicas, reológicas y morfológicas de maíces pozoleros después de nixtamalizar y al adicionar grasa animal durante la elaboración de pozole, así como el contenido de almidón resistente. Se estudiaron tres variedades de maíz (Cacahuacintle y dos variedades mejoradas), las cuales fueron nixtamalizadas y sometidas a cocción con 4 niveles de grasa (0, 6, 8 y 10%). Los resultados mostraron un aumento en el contenido de almidón resistente al incrementar el porcentaje de grasa durante la cocción. El perfil de viscosidad se vio afectado por la dureza del grano, la adición de grasa y la formación de complejos amilosa-lípidos. Todas las muestras con grasa añadida mostraron la primer endoterma de complejos amilosa-lípidos, mientras que la variedad Cacahuacintle y Pozolero 2 mostraron la segunda y tercer endoterma de complejos amilosa-lípidos. Los patrones de difracción de rayos X mostraron una modificación en la estructura ortorrómbica del patrón A al someter las muestras a cocción. En conclusión, la dureza del grano del maíz pozolero y la adición de grasa animal durante la elaboración de pozole tuvieron un efecto significativo en la formación de almidón resistente V.

Palabras clave: Maíz, pozole, almidón, complejos amilosa-lípidos.

1. ANTECEDENTES

1.1 Maíz

El maíz es considerado un alimento básico en la dieta mexicana, ya que representa la mitad del volumen total de alimentos consumidos cada año, y suministra a la población cerca de la mitad de las calorías requeridas. El producto de maíz más consumido en México es la tortilla y ésta proporciona la tercera parte de las proteínas consumidas por la población (Massieu, 2002).

México se considera el centro de origen y diversidad del maíz. Este grano ha sido la base de la alimentación desde las culturas prehispánicas. Por cientos de años, la población mexicana y de Sudamérica han desarrollado nuevas variedades de maíces, adaptándolas a las condiciones locales y también a las preferencias culinarias (Figueroa y col., 2013). Actualmente en el mundo se han agrupado más de 300 razas de maíz, de las cuales 59 se encuentran en México, lo que representa el 20% de la diversidad mundial (López-Morales y col., 2017).

Por considerar al maíz como un alimento de alto consumo, se han realizado investigaciones y desarrollado métodos que mejoran la funcionalidad y la calidad de nutrientes de los alimentos basados en este cereal. La nixtamalización es un proceso tradicional mexicano desarrollado por las civilizaciones Mesoamericanas que sigue siendo utilizado y es uno de los métodos más estudiados, ya que es crítica para el incremento del valor nutricional del maíz y es empleada para la elaboración de diversos productos (Sefa-Dedeh y col., 2004; Méndez-Montealvo y col., 2006).

Se han identificado al menos 10 razas de maíz para la elaboración del pozole, entre ellas se encuentran: Cacahuacintle, Ancho, Elotes Occidentales, Tabloncillo, Jala, Bofo, Harinoso de Ocho, Gordo, Blando de Sonora y Bolita; los cuales se caracterizan por el gran tamaño de sus mazorcas y de sus granos, así como la suavidad del endospermo (Vázquez-Carrillo y col., 2013).

1.1.1 Maíz Cacahuacintle

De la gran variedad de razas de maíz con las que México cuenta, el maíz Cacahuacintle ha sido la raza con mayor distribución y diversificación de su comercialización para el pozole, se consume principalmente en el Valle de México. Al tener un nicho ecológico muy específico, el maíz Cacahuacintle se cultiva en los estados de México, Puebla y Tlaxcala debido a que se encuentra limitado a altitudes de 2200 a 2800 m (Vázquez-Carrillo y col., 2013). El grano de maíz Cacahuacintle se identifica por ser de color blanco, tener una textura harinosa y de tamaño grande, la forma del grano se caracteriza por ser redondeada y globosa. Una vez que el maíz es cosechado, se almacena para su acondicionamiento, las mazorcas que cuentan con los granos más grandes y alargados son consideradas óptimas para descabezar, se considera que en este proceso de descabezado se desperdicia en promedio 8% del producto (Vázquez-Carrillo y col., 2013).

1.1.2 Elotes Occidentales

De acuerdo a la clasificación hecha por Wellhausen y col. (1951), la raza Elotes Occidentales se encuentra dentro del grupo de razas “Exóticas Precolombinas”, identificándola como una subraza del grupo “Harinoso de Ocho”, pero estudios posteriores indican que Elotes Occidentales es un complejo de maíz harinoso de ocho hileras del oeste de México, modificado ligeramente en la altiplanicie de Jalisco y la zona costera de Nayarit; está relacionado con variedades como Tabloncillo y Bofo (Ron-Parra y col., 2006). Se encuentra a alturas entre 1000 y 1500 m de la Sierra Madre Occidental, en los estados de Michoacán, Jalisco, Guanajuato y Nayarit. Se ha denominado como un maíz del tipo pozolero, y es apreciado por el gran tamaño del grano, su textura harinosa y la suavidad del grano que facilita el reventado de los mismos. Además de presentar un color morado o rojo (Ron-Parra y col., 2006; Ochoa, 2017).

1.1.3 Pozole

El pozole, del náhuatl *pozolli*, "espumoso", de *pozol* "espuma" ha sido un platillo típico de México desde las culturas prehispánicas. Es elaborado con granos de maíz (*Zea Mays L.*) suave; consiste en una sopa de granos de maíz, carne y acompañado de verduras. El pozole es preparado a partir del nixtamal (en donde se remueve la capa externa del grano), seguido de un hervido de los granos con la carne lo que permite la obtención del producto (Figuroa y col., 2013; Vázquez-Carrillo y col., 2013).

Para la elaboración del pozole se pueden identificar dos procesos, el tradicional y el comercial. En la elaboración del pozole de manera tradicional, primeramente, el grano debe ser sometido al proceso de nixtamalización. La nixtamalización es un proceso térmico-alkalino, la cual tiene como objetivo remover parcialmente la capa externa del grano, ablandar el grano; además de proporcionarle un sabor característico. Adicionalmente el proceso de nixtamalización aporta propiedades nutricionales. Para esto se cuece con hidróxido de calcio al 1% por 16 horas el grano, posteriormente se lava y se retira parcialmente el pericarpio. Para reducir el tiempo de cocción y del reventado del grano se elimina la punta o pico de éste. Como paso final, el maíz descabezado se somete a una última cocción en agua, la cual constituye el caldo del pozole (Bonifacio-Vázquez y col., 2005; Vázquez-Carrillo y col., 2013). De igual manera en el proceso comercial, el grano es sometido al proceso de nixtamalización, sin embargo, la cantidad de hidróxido de calcio que las empresas agregan es variable (0.3 a 0.5 g cal/100 g maíz), posterior a esto se lleva a cabo el lavado y descabezado, para tener como paso final una pre-cocción del grano, la cual consiste en poner a ebullición el maíz descabezado con ácido fosfórico durante un tiempo corto; con este procedimiento el floreado del maíz se realiza en un menor tiempo (3 a 4 horas) (Vázquez-Carrillo y col., 2013).

1.2. Generalidades del almidón

El almidón es uno de los productos más utilizados, desde la industria alimentaria, fabricación de bio-plásticos hasta la industria papelera y textil (Dupuis y col., 2014). Es un homopolisacárido, en donde los mayores componentes del almidón son amilosa, amilopectina, además de lípidos, proteínas y minerales, como componentes secundarios. Los almidones tienen diferente funcionalidad según su origen, ya que de ésta depende la cantidad de amilosa y amilopectina, así como sus respectivos grados de polimerización, su cristalinidad y el contenido mineral, especialmente el contenido de fósforo (Dupuis y col., 2014).

El almidón proveniente de cereales contiene lípidos integrales en forma de lipofosfolípidos (LPL) y ácidos grasos libres (FFA) los cuales se correlacionan con la fracción de amilosa contenida en el gránulo, parte de la amilosa que interacciona con la parte lipídica forma un complejo de inclusión en donde la cadena de ácidos grasos se localiza dentro del núcleo hidrofóbico de la única hélice de amilosa (Tester y col., 2004). Se tiene reportado que los lípidos representan entre un 0.8 y 1.2% del total del gránulo (Buléon y col., 1998). Las proteínas localizadas en el gránulo de almidón intervienen en la funcionalidad del almidón (Tester y col., 2004). Dentro de los gránulos de almidón se encuentran minerales en pequeñas cantidades no mayores a 4%, entre ellos se encuentra el calcio, magnesio, potasio y sodio. El fósforo, que se encuentra en mayores cantidades, puede ser encontrado en tres formas, en fosfato monoésteres, fosfolípidos y en fosfato inorgánico (Tester y col., 2004). Como principales componentes en la superficie del gránulo se encuentran proteínas (10%), lípidos (10-15%), enzimas, aminoácidos y ácidos nucleicos. Estos componentes pueden ser extraídos sin romper el gránulo (Buléon y col., 1998).

Según la fuente de donde se obtenga el almidón se tendrán diferentes proporciones de amilosa y amilopectina, así como diferente cristalinidad, grado de polimerización y contenido mineral, especialmente de fósforo (Tester y col., 2004).

El punto de partida para la biosíntesis del almidón es la sacarosa, la cual proviene de la fotosíntesis de la planta. La primera parte del proceso se lleva a cabo en el citosol de la célula, dónde la sacarosa es convertida a glucosa uracilo difosfato (UDP-glucosa) y a fructosa por la enzima sacarosa sintasa, como paso siguiente la UDP-glucosa es convertida en presencia de pirofosfato y por la acción de la enzima UDP-glucosa pirofosforilasa a glucosa-1-fosfato (G-1-P) para posteriormente ser convertido a glucosa-6-fosfato por la enzima fosfoglucomutasa para poder transportarlo a través de la membrana del amiloplasto por un trasportador específico y es convertido nuevamente a G-1-P por la fosfoglucomutasa. En los amiloplastos G-1-P es convertido por la enzima ADP-glucosa pirofosforilasa a ADP-glucosa la cual es la molécula responsable de los residuos de glucosa para la formación de almidón (Figura 1) (Tester y col., 2004).

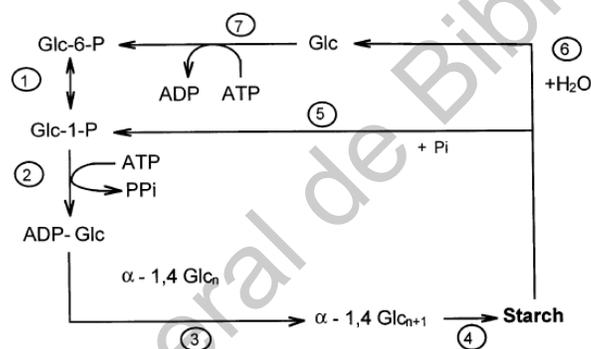


Figura 1. Esquema de biosíntesis de almidón. 1) Fosfoglucomutasa; 2) ADP-glucosa pirofosforilasa; 3) síntesis del almidón soluble; 4) enzimas de ramificación; 5) almidón fosforilasa; 6) amilasas, maltasas; 7) hexoquinasa (Buleón y col., 1998)

1.2.1 Amilosa

Se consideraba a la amilosa como una molécula lineal; sin embargo, actualmente se sabe que contiene un pequeño porcentaje de ramificaciones. Se define como un α -glucano que cuenta con enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$ en un 99% y el resto son enlaces $\alpha(1 \rightarrow 6)$ (Tester y col., 2004). Su peso molecular se encuentra aproximadamente entre 1×10^5 y 1×10^6 Da, y es conocido que la amilosa de alto peso molecular del maíz o arroz contiene una gran proporción de cadenas muy cortas en comparación a las moléculas de amilosa más pequeñas (Pérez y col., 2010). Cuenta con un grado de

polimerización de 324-4920 con alrededor de 9-20 puntos de ramificación, esto es equivalente a 3-11 cadenas por molécula de amilosa, se calcula que cada cadena de amilosa contiene aproximadamente de 200 a 700 residuos de glucosa; además tiene propiedades hidrofílicas debido a los grupos hidroxilo presentes (Tester y col., 2004). Esta molécula es completamente hidrolizada por la enzima β -amilasa, la cual únicamente ataca los enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$ del final no reductor de la cadena, dando como resultado la liberación de unidades de β -maltosil (Buléon y col., 1998).

La amilosa juega un papel muy importante para la diferenciación de almidones, se ha comprobado que la cantidad de amilosa es determinante en la etapa inicial de la gelatinización además de que tiene un efecto en la cristalinidad y en la resistencia a un ácido o álcali durante modificaciones químicas o físicas del almidón (Kou y col., 2018). En solución acuosa, las cadenas de amilosa adoptan una estructura coloidal inestable y tienden a formar una inclusión helicoidal instantánea, estas estructuras pueden formar complejos con agentes acomplejantes como monoacil lípidos, emulsificantes, alcoholes, componentes de sabor entre otros. Después de un cocimiento, los patrones de Rayos X muestran una nueva señal que difiere de un patrón A, B y C, el cuál es llamado patrón V. Cuando hay una ausencia de agentes acomplejantes, las moléculas de amilosa se asocian entre ellas de acuerdo al tamaño de éstas. Las estructuras helicoidales han sido estudiadas por Rayos X, y se han observado los patrones del tipo A y B, en donde las hélices de ambos tipos están relacionadas y son paralelas; sin embargo, difieren en la estructura ya que la hélice del tipo A tiene a maltotriosil como una unidad repetida, mientras que en la hélice del tipo B la unidad repetida es la maltosil (Pérez y Bertoft, 2010).

1.2.2 Amilopectina

La amilopectina es el componente ramificado del almidón, ya que está formado por cadenas de residuos de α -D-glucopiranosil unidos mediante enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$ y aunque solo contiene 5-6 % de enlaces $\alpha(1 \rightarrow 6)$ las propiedades de este polímero difieren significativamente de la amilosa (Buléon y col., 1998). Cuenta con un peso

molecular de 1×10^7 - 1×10^9 Da, su grado de polimerización (GP) se encuentra en un rango de 96000-15900 (Tester y col., 2004).

De acuerdo a Peat y col. (1952) estas cadenas siguen una organización que se describe como A, B y C (Figura 2). A las cadenas exteriores se les denomina A, las cuales están unidas glucosídicamente a un grupo reductor a través de un enlace $\alpha(1 \rightarrow 6)$ al interior de una cadena B, por lo que la cadena B tiene como ramificaciones cadenas A; y por último la cadena C también contiene otras cadenas como ramificaciones, sin embargo, ésta contiene al sitio reductor terminal. Un parámetro de importancia es la relación que hay de cadenas A y B (Buléon y col., 1998).

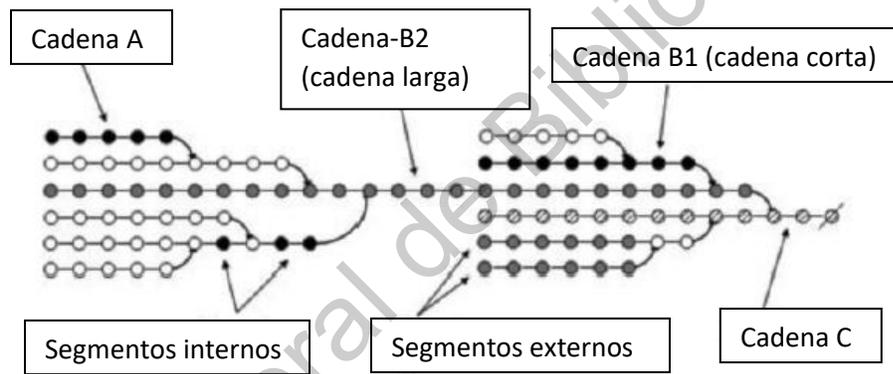


Figura 2. Cadenas presentes en la molécula de amilopectina (adaptado de Pérez, 2010)

Se ha identificado que la amilopectina está formada de tres tipos de cadenas, las cadenas cortas –S-, que consisten en cadenas A y B con un GP entre 14 y 18; cadenas largas con un GP de 45-55 y cadenas B de GP 60. Las cadenas más importantes son las cortas, S, que se han encontrado organizadas en clústeres, éstos no están organizados de manera distribuida en la molécula de almidón y aún no se encuentra una definición de clúster, se sugiere un tamaño de clúster entre 4 a 34 cadenas, se ha estimado que en una macromolécula se encuentran aproximadamente de 60 a 120 clústeres (Pérez, 2010). Las cadenas A se consideran un factor que influye en la cristalinidad, se ha visto que un alto contenido de cadenas cortas resulta en una alta cristalinidad (Pérez, 2010); además el

conjunto lateral de los clústeres puede explicar la formación de cristales. A pesar de que la amilopectina está formada por ramificaciones y de su alto peso molecular, cuenta con una viscosidad intrínseca baja (120-129 ml/g) (Buléon y col., 1998). Al igual que en la amilosa, la β -amilasa remueve las cadenas externas de la amilopectina; sin embargo, el porcentaje de β -amilolisis es solamente del 52 al 58%, aquellas partes que son resistentes contienen cadenas A muy cortas (Pérez, 2010).

1.3 Estructura de los gránulos de almidón

La organización de los gránulos de almidón depende de su origen. Los gránulos de almidón, son considerados como un material poroso, se observa en su área superficial e interna. La superficie externa es determinada por la forma y tamaño de la partícula la cual puede ser observada por microscopio, mientras que el área interna es definida como la estructura capilar de las partículas hidratadas, así como del tamaño de agente penetrante (Buléon y col., 1998).

Cuando los gránulos de almidón son observados bajo luz polarizada, se puede observar en el centro una cruz característica considerada como esferocristales distorsionados. Este fenómeno se llama birrefringencia e indica que la orientación de las cadenas de polímeros es radial. La intensidad de esta propiedad depende de la forma y la orientación de los gránulos con respecto al haz de luz. Para aquellos gránulos que no son esféricos se dice que la orientación de las cadenas es perpendicular al crecimiento de los anillos y a la superficie del gránulo (Buléon y col., 1998). La distribución de las áreas cristalinas y amorfas puede ser observada a través de una hidrólisis ácida, ya que bajo estas condiciones el gránulo se degrada y se rompe, mostrando su organización laminar. El área más resistente al ácido consiste en la parte cristalina del gránulo, mientras que aquella que sea más susceptible a la degradación será el área amorfa del gránulo (Buléon y col., 1998).

1.3.1 Cristalinidad

Las cadenas de amilosa y amilopectina pueden formar una doble hélice la cual se asocia con la formación de cristales. Las cadenas exteriores de los cereales, que

son generalmente cortas, favorecen la formación polimórfica cristalina del tipo A, que es más estable; las cadenas exteriores de los tubérculos generalmente forman cristales del tipo B. También se observa la formación de cristales tipo C, los cuales son una combinación entre ambas cadenas (Tester y col., 2004).

La estructura cristalina llamada del tipo A es compacta con un bajo contenido de agua (ocho moléculas de agua por unidad), esta estructura presenta una unidad repetida de maltotriosil; mientras que los cristales tipo B tienen una estructura un poco más abierta y en el centro contiene 36 moléculas de agua con una unidad repetida de maltosil (Figura 3) (Buléon y col., 1998). El concepto de V-amilosa se refiere a una sola hélice co-cristalizada con compuestos como el yodo, DMSO, alcoholes o ácidos grasos. La forma más común que se observa es el complejo con los lípidos, la cual está empacada en una unidad ortorrómbica con 16 moléculas de agua, estos complejos pueden ser cristalinos o amorfos, depende de la temperatura a la que se formen (Buléon y col., 1998).

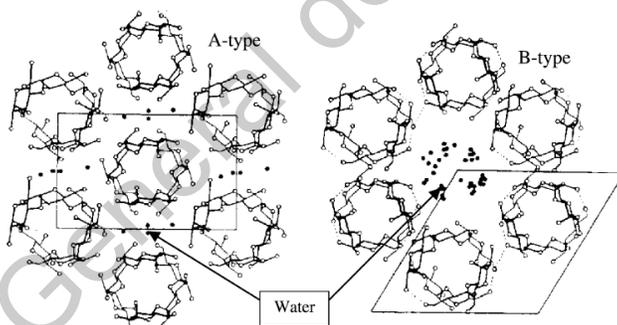


Figura 3. Estructura de cristales de amilosa (Tester y col., 2004)

Usando resonancia magnética nuclear se ha investigado la presencia de estructuras helicoidales, encontrándose la presencia de: dobles hélices de amilopectina, regiones de espacio entre cadenas y ramificaciones, doble hélice entre amilosa y alfa-glucanos, amilopectina amorfa, amilosa amorfa, hélices entre amilosa y amilopectina, y complejos de amilosa-lípidos (Tester y col., 2004).

El contenido de dobles hélices de almidón depende de su origen y de las condiciones de crecimiento de la planta o cereal. La longitud de las cadenas

envueltas en la fase cristalina y su ramificación puede influir en la cristalinidad del almidón y en el tipo de cristal. Además, la temperatura y la humedad durante el crecimiento son importantes, se obtiene un cristal tipo A en condiciones templadas y secas, mientras que el cristal tipo B se obtiene en condiciones húmedas y frías (Buléon y col., 1998). A pesar de que la amilosa forma parte importante del almidón, el componente cristalino principal es la amilopectina, se considera a la amilosa como un diluyente de la amilopectina, por lo que ciertos autores han propuesto que la amilosa interfiere en la formación de cristales de amilopectina (Tester y col., 2004).

1.4 Tratamientos térmicos del almidón

1.4.1 Gelatinización

La gelatinización del almidón es una transición irreversible de los gránulos de almidón, que pasan de un estado estructurado a un estado desordenado a partir de un calentamiento continuo (Tan y col., 2008). Este fenómeno sucede cuando un almidón nativo es suspendido en agua y posteriormente sometido a calentamiento, en donde el gránulo de almidón absorbe agua y comienza a hincharse, como consecuencia de esto se observa una pérdida de cristalinidad, así como de birrefringencia, lo cual sugiere una fusión de las estructuras de los gránulos de almidón. El almidón se gelatiniza en un exceso de humedad, Wang y col. (1991), definen como un exceso de agua que sobrepase el 63% de humedad, estos resultados indican que al menos se necesitan 14 moléculas de agua para que una molécula de glucosa pueda gelatinizarse; cuando la humedad del grano es limitante, la gelatinización ocurre en un mayor tiempo (Lai y col., 1991).

Durante la gelatinización primero el agua penetra la región amorfa del gránulo, se inicia el hinchamiento y disminuye la birrefringencia, posteriormente, se llevan cadenas de almidón a la superficie a medida que aumenta la temperatura. Al incrementar la temperatura, el movimiento de las moléculas y la solvatación debido al hinchamiento fuerza a una disrupción de las regiones cristalinas, desenrollando las dobles hélices hasta que la estructura granular se haya eliminado y en cambio se obtenga un gel (Lai y col., 1991). La fusión de las estructuras del gránulo ocurre en

un alto rango de temperaturas que puede ir de 61°C a 77°C (Santiago-Ramos y col., 2017), y ésta aumenta al disminuir el contenido de humedad del almidón. La temperatura a la cual se observa este fenómeno, llamada como temperatura de gelatinización, es atribuida a los diferentes grados de cristalinidad del gránulo de almidón, así como de la humedad que contenga (Zobel y col., 1988).

El fenómeno de gelatinización puede estudiarse con diferentes técnicas, por el método del yodo, en donde solo la fracción de amilosa puede formar un complejo con el yodo, este método es basado en que un almidón gelatinizado es más soluble en agua y se acompleja más rápido con el yodo que aquél que no lo está, la intensidad del color del yodo dependerá del peso molecular de la cadena de amilosa; por el método de digestión enzimática, el almidón gelatinizado es digerido por la enzima glucoamilasa, resultando glucosa que puede reaccionar con o-toluidine formando un cromogénico en ácido acético. Otro método para determinar de forma indirecta es midiendo la viscosidad, la cual está basada en el cambio de torque durante la gelatinización, ésta puede ser medida con el uso de amilogramas, en estas gráficas el diferencial de viscosidad indica al grado de gelatinización del almidón, éste concepto se define por:

$$\Delta V = (V_F - V_i)$$

En donde V_F es la viscosidad final de la suspensión del almidón (a una temperatura de 95°C) y V_i es la viscosidad de la suspensión de almidón a temperatura de 30°C. Un decremento de los números del amilograma indica un aumento en el grado de gelatinización (Lai y col., 1991).

Para una humedad igual o superior del 30%, las transiciones endotérmicas se determinan por calorimetría, con esta técnica se puede confirmar la pérdida de una estructura cristalina. En este método la muestra y un material inerte son calentados uniformemente, la diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia es convertida en un cambio de entalpía. Los resultados obtenidos pueden ser relacionados con el rompimiento de los enlaces de hidrógeno del almidón-almidón para hacer enlaces almidón-agua incrementado la entropía (Lai y col., 1991). En la

medición por DSC se pueden determinar T_0 , T_p , T_c y ΔH ; en donde T_0 representa la temperatura inicial de gelatinización, T_p representa el pico de temperatura endotérmica, T_c representa la temperatura en la que ya no hay gelatinización o temperatura final y finalmente ΔH indica la entalpía de transición. Estas temperaturas se ven afectadas por la velocidad de calentamiento y la cantidad de agua, así como el grado de daño en el almidón (Tester y col., 2002).

1.4.2 Retrogradación

Cuando se gelatiniza el almidón se pasa de un estado ordenado a un estado amorfo, posteriormente, durante el enfriamiento del almidón gelatinizado, éste pasa de un estado amorfo a un nuevo estado cristalino, este fenómeno se denomina retrogradación. Por lo tanto, la retrogradación es definida como los cambios que ocurren en el almidón después de la gelatinización y cuando hay un descenso de temperatura a través del tiempo. El proceso de retrogradación ocurre cuando las moléculas que conforman al almidón gelatinizado comienzan a asociarse en una estructura más ordenada, que en condiciones favorables llevan a la formación de cristales (Rojas-Molina y col., 2007). Al enfriarse el almidón, la pasta se transforma en un gel con gránulos de almidón gelatinizado que están interconectados en una red de polímeros agregados recristalizados (Wang y col., 2016). Este fenómeno se relaciona con la estabilidad del almidón durante el almacenamiento (Rojas-Molina y col., 2007).

1.5 Nixtamalización

La nixtamalización consiste en la cocción del maíz en una solución alcalina, generalmente es utilizado el hidróxido de calcio, el maíz cocido conocido como nixtamal es lavado con agua para la remoción parcial de estructuras como pericarpio y el exceso de calcio (Fernández-Muñoz y col., 2004); al agua de cocción y reposo se le denomina nejayote, y es considerada como un contaminante debido a su alcalinidad que además puede dañar los equipos utilizados (Mariscal-Moreno y col., 2015).

La cantidad de calcio añadido en el proceso de nixtamalización es determinante para las características sensoriales y fisicoquímicas de los productos, debido a la interacción del hidróxido de calcio y los diferentes componentes del grano (Fernández-Muñoz y col., 2004). Otros efectos de la nixtamalización, es el incremento de la biodisponibilidad de niacina y del contenido de calcio en el grano así como, la reducción de la concentración de aflatoxinas en el grano (Sefa-Dedeh y col., 2004).

En un estudio realizado por Fernández-Muñoz y col. (2004), se encontró que los granos absorbieron una cantidad significativa de calcio durante el cocimiento, ya que se observó un incremento del casi 400% del contenido del calcio, explicándose que en un tiempo no mayor de 5 horas la difusión del ion calcio toma lugar principalmente en el pericarpio, mientras que al aumentar el tiempo de contacto el calcio se difunde al endospermo y al germen, con lo que se comprobó lo que Mc Donough y col. (2001) habían concluido.

También se ha encontrado que el sobrecocido del grano en la solución alcalina del nixtamalizado permite una mayor absorción de agua en los granos de maíz, esto puede ser como consecuencia de la gelatinización del almidón durante la cocción del grano, ya que la nixtamalización lo facilita y hace más rápido el fenómeno (Sefa-Dedeh y col., 2004). En este mismo estudio se encontró un aumento en el porcentaje de proteína de 8.14 al 8.88 % en un tiempo de 30 minutos en contacto con la solución alcalina. Durante la nixtamalización se puede apreciar un cambio en el color del grano, este cambio es resultado de la acción del hidróxido de calcio (Sefa-Dedeh y col., 2004).

El proceso de nixtamalización lleva consigo un cambio en la estructura del gránulo del almidón, y estos cambios son asociados a procesos como la gelatinización (*pasting*) y la retrogradación. Se ha demostrado que los cambios fisicoquímicos que se llevan a cabo en el grano nixtamalizado dependen del contenido de calcio, ya que la difusividad térmica, el pico de viscosidad y la cristalinidad aumentan al aumentar el contenido de calcio (Rojas-Molina y col., 2007).

Un parámetro de calidad del grano muy importante en el proceso de nixtamalización es la proporción entre endospermo suave y duro, ya que, durante el calentamiento en la solución alcalina, los cambios estructurales, reológicos, de textura y mecánicos son determinados por dicha proporción. Los gránulos de almidón del endospermo son estructuras esféricas, mientras que el endospermo duro presenta gránulos de almidón poligonales. Estos tipos de empacamiento de los gránulos afectarán la absorción de agua y calcio (Rojas-Molina y col., 2007).

El maíz cuenta con una deficiencia de lisina y triptófano, sin embargo, el proceso de nixtamalización incrementa la disponibilidad de la mayoría de los aminoácidos esenciales. El valor biológico de la proteína se incrementa en la nixtamalización, este valor se mide por la cantidad de nitrógeno que el cuerpo asimila, por lo que la nixtamalización mejora considerablemente el aporte nutritivo de las proteínas del grano del maíz. Además, este proceso provoca que la niacina presente en el grano de maíz sea liberada como ácido nicotínico el cual es aprovechado por el organismo (Paredes-López y col., 2009).

1.6 *Annealing*

Annealing, se define como un tratamiento térmico usado para impartir propiedades deseadas en los materiales, en la ciencia alimentaria y de cereales, se utiliza principalmente en el procesamiento del almidón. Este fenómeno puede suceder durante la nixtamalización y brindarle al gránulo de almidón estabilidad durante su procesamiento, así como modificar su viscosidad y su capacidad de hinchamiento, estos cambios en las propiedades térmicas del almidón tienen una implicación directa en la calidad del producto final (Figuroa y col., 2013).

Este fenómeno sucede cuando el almidón es mantenido en exceso de agua por un periodo de tiempo a temperaturas menores a la temperatura de gelatinización del mismo, como consecuencia se tiene un reordenamiento de la estructura del almidón (Figuroa y col., 2013). Se ha reconocido que el *annealing* se asocia con una gelatinización parcial, además de que lleva a un incremento en las temperaturas de gelatinización (Tester y col., 2000).

Figuroa y col. (2013) comprobaron que el *annealing* del almidón aumenta la temperatura de pasta y la estabilidad del gránulo de almidón ante un colapso, además de incrementar la viscosidad del mismo. Sin embargo, otros estudios demostraron que en almidón de lenteja y avena disminuye la viscosidad al aplicarle dicho tratamiento. Por este motivo se ha dado mucha importancia a su estudio, ya que las propiedades brindadas al almidón durante este tratamiento han sido de gran importancia en la industria alimentaria (Tester y col., 2000).

Un fenómeno que se confunde con el *annealing* es el tratamiento *heat-moisture*, Jacobs y Delcour (1997) discutieron la diferencia entre estos dos fenómenos, establecieron que el *annealing* se da en tratamientos con un exceso de agua (40 al 60 %), mientras que el *heat-moisture* se encuentra entre una humedad de 35%. Estos dos fenómenos ocurren sobre la temperatura de transición vítrea y por debajo de la temperatura de gelatinización (Tester y col., 2000). La temperatura de transición vítrea se considera un parámetro importante que afecta las propiedades físicas poliméricas, éste término describe la temperatura a la cual se induce una transición de un estado amorfo a un estado gomoso cuando es calentado. A una humedad baja la temperatura de transición vítrea aumenta lo que causa un aumento de temperaturas de gelatinización (Tester y col., 2000).

1.7 Almidón resistente

El almidón puede clasificarse de acuerdo a su digestibilidad, puede ser dividido en tres categorías: almidón rápidamente digerido (RDS), almidón lentamente digerido (SDS) y almidón resistente (RS). Las primeras dos fracciones (RDS y SDS) se refieren a almidón que es hidrolizado a dextrinas por la enzima α -amilasa en un tiempo de 20 a 120 minutos de digestión, mientras que el almidón resistente es aquella porción de almidón que no puede ser hidrolizado y que pasa al intestino grueso o colón sin ser digerido, y es fermentado por la microbiota de éste. Los productos de la fermentación del almidón resistente dentro del colón son ácidos grasos de cadena corta (generalmente ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico), los cuales aportan beneficios a la salud: promueven la salud de la

microbiota ya que actúan como sustrato de ésta; son metabolizados en el cuerpo como cuerpos cetónicos, los cuales son utilizados como energía por el cerebro y el corazón; decrecen la necesidad de glucosa en el cuerpo; mejoran el perfil lipídico en sangre e incrementan la absorción de micronutrientes. Además, hay evidencia de que el almidón resistente puede ayudar a inhibir la formación de úlceras y cáncer de colon (Fuentes-Zaragoza y col., 2010; Dupuis y col., 2014; Taylor y col., 2015). El tiempo de transición del almidón al intestino grueso depende de diferentes factores, como la funcionalidad gastrointestinal de cada individuo, la concentración de enzimas de digestión, la viscosidad del fluido gástrico, así como de la matriz del alimento (Dupuis y col., 2014).

El índice glicémico fue definido por primera vez por Jenkins y col. (1981), es usado para estimar *in vitro* o *in vivo* el efecto de los carbohidratos disponibles en los alimentos en la respuesta glicémica. El índice glicémico representa la medida de la concentración promedio de glucosa en el torrente sanguíneo al consumir alimentos en un tiempo estimado de dos horas (Taylor y col., 2015). Alimentos que contienen RDS generalmente tienen un alto índice glicémico, el cual es la medida de qué tan rápido la glucosa del alimento es liberada y absorbida por la sangre; este tipo de alimentos es asociado con un decremento de saciedad por lo que pueden estimular el consumo excesivo de alimentos por día y contribuir al riesgo de obesidad (Dupuis y col., 2014). Los alimentos con SDS, que es digerido más lento y RS, el cual no es digerido son considerados como alimentos de bajo índice glicémico.

1.7.1 Métodos para determinar el contenido de almidón resistente

Existen diferentes métodos para medir el contenido de almidón resistente en alimentos, en la Tabla 1 se describen algunos de ellos:

Cuadro 1. Métodos de medición de almidón resistente

Método	Reactivos	Fundamento
Englyst y col. (1992)	Goma guar Ácido clorhídrico (0.05M)	En este método se trata de imitar la acción gastrointestinal utilizando una solución de goma guar en HCl para impartir viscosidad. Puede calcularse RDS y SDS (en tiempos de 20 y 120 min) y RS.
AOAC 2002.02 AACC 32-40 (2011)	Kit Megazyme SR (amilasas pancreáticas y amiloglucosidasas) KOH	La muestra es hidrolizada por 16 horas usando el kit de enzimas Megazyme a 37°C, posteriormente se centrifuga la muestra, y el pellet es hidrolizado a glucosa con KOH.
AOAC 991.43 (2012)	Kit TDF	RS se determina por la diferencia de peso entre la muestra antes y después de la hidrólisis.
AOAC 2002.02	Pancreatina	RS se determina por diferencia de peso antes y después de hidrólisis

(Dupuis y col., 2014)

1.7.2 Tipos de almidón resistente

El almidón resistente se divide en cinco clases: almidón resistente tipo 1 (RS1), es el almidón que no está disponible físicamente el cuál se encuentra en la cáscara de los cereales; almidón resistente tipo 2 (RS2), está compuesto por almidón resistente nativo de ciertos orígenes (papa, plátano verde, maíz alto en amilosa y algunas legumbres), en estos almidones se encuentra la molécula de amilopectina en una

alta proporción, lo que resulta en una estructura más rígida haciendo al almidón más resistente ante un ataque enzimático, es característico encontrar almidones con una estructura del tipo B la cual previene la acción de las enzimas digestivas; almidón resistente tipo 3 (RS3), se trata del almidón retrogradado; almidón resistente tipo 4 (RS4), es el almidón que ha sido modificado químicamente por diferentes procesos como esterificación o eterificación en el grupo hidroxilo libre del anillo de la glucosa; y por último se encuentra el almidón resistente tipo 5 (RS5), el cual es un complejo entre la fracción de amilosa y un compuesto lipídico, el cual forma una hélice en donde el ácido graso se encuentra en el centro (Dupuis y col., 2014).

El RS3 es uno de los RS más estudiados debido a sus características, como su termoestabilidad, su alta temperatura de gelatinización, y su baja retención de agua, así como por los beneficios que confiere a los alimentos, ya que mejora su textura, apariencia y propiedades organolépticas. El almidón resistente tipo 3 depende fuertemente de la cantidad y de la longitud de cadenas de amilosa, ya que a mayor cantidad y longitud se tiene una mayor cantidad de este tipo de almidón resistente; otro factor que influye en la formación de RS3 son los ciclos de enfriamiento y calentamiento hechos durante el almacenamiento, así como el tiempo y temperatura de éste. El *annealing* favorece la formación de RS3. Aunque generalmente se relaciona este tipo de almidón resistente a la retrogradación de la amilosa, también se presenta retrogradación la amilopectina, ésta tiene una retrogradación más lenta que la amilosa y no es tan resistente como esta última. Del total de almidón resistente tipo 3, aproximadamente un 84% es degradado por la fermentación bacteriana en el colón (Fuentes-Zaragoza y col., 2010; Dupuis y col., 2014; Tacer-Caba y col., 2018).

Los lípidos, pero más en específico los ácidos grasos, pueden interactuar con el almidón para formar complejos con la amilosa-lípidos (Taylor y col., 2014). La formación del RS5 se ve favorecida por los residuos hidrofóbicos que se encuentran en el interior de la hélice de amilosa, es por esto que el ácido graso se encuentra en el interior de la hélice. Este tipo de complejos pueden ser encontrados en dos formas, en la primera pueden ser encontrados en un orden aleatorio, es decir, se

encuentran en un estado amorfo, mientras que en la segunda forma se encuentran ordenados de una manera más cristalina; se ha encontrado que la forma uno es precursor de la segunda. Este tipo de almidón resistente ha demostrado ser termoestable, si bien en un calentamiento el complejo puede disociarse, al ser enfriado se re-asocia inmediatamente el complejo (Dupuis y col., 2014).

Se ha reportado que los ácidos grasos de cadena corta, como el ácido láurico y mirístico, tienen una mayor incidencia en los complejos amilosa-lípidos que aquellos ácidos grasos de cadena larga, como el palmítico o el esteárico. Sin embargo, la presencia de dobles enlaces, como en el ácido linoleico y oleico, mejoran la formación de estos complejos que los ácidos grasos saturados (Dupuis y col., 2014). A pesar de que la formación del almidón resistente es debido a la interacción con lípidos, no todos éstos favorecen la formación de almidón resistente, los triglicéridos tienen un impacto ante la formación de este tipo de almidón, Escarpa y col. (1997) observaron que al añadir aceite de oliva (constituido mayormente de ácido oleico y linoleico) en el almidón de papa, se presentó un decremento del almidón resistente de 18.2 a 11.3%.

Se han propuesto dos mecanismos por los cuales este tipo de almidón (RS5) resiste la digestión enzimática; el primero de ellos indica que el complejo de amilosa-lípidos disminuye el hinchamiento de los gránulos por lo que dificulta la entrada de enzimas para hidrolizarlo; mientras que el otro mecanismo puede ser que el complejo amilosa-lípido es más resistente al ataque de enzimas que las cadenas de amilosa libres (Tacer-Caba y col., 2018).

2. HIPÓTESIS

La adición de grasa animal en la preparación de pozole, afectará el contenido de almidón resistente en maíces pozoleros.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar las propiedades térmicas, reológicas y morfológicas de tres variedades de maíz pozolero al adicionar grasa animal durante la elaboración de pozole y evaluar la formación de almidón resistente.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente tres variedades de maíz utilizados en la elaboración de pozole.
- Determinar las propiedades térmicas, reológicas y morfológicas de maíz, maíz nixtamalizado y pozole.
- Determinar el porcentaje de grasa óptimo para la mayor formación de complejos amilosa-lípidos en la elaboración de pozole, en cada variedad de maíz.

4. METODOLOGÍA

4.1 Materiales

La muestra de maíz Cacahuacintle (maíz blanco) así como la grasa animal (manteca de cerdo) fueron obtenidas en un supermercado en Querétaro, México. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Celaya, Guanajuato proporcionó dos variedades mejoradas de maíz Elotes Occidentales (maíces morados) del ciclo primavera-verano 2014, la primera variedad se nombró Pozolero 1 que corresponde a un híbrido 9x13 (({(HCB2 x Criollo negro Elote cónico)-⊗'s-3-1-1 X (HCB1 x criollo colorado cónico norteño)-2-1-2} X (HCB8 x Criollo colorado cónico norteño)-1-1-1]-⊗'s-2-5-2; QRO.18); la segunda variedad se nombró Pozolero 2 que corresponde a un híbrido 3x18 ((HCB2 x criollo colorado elote cónico)-4-1-3-⊗-2-1-⊗).

El hidróxido de calcio fue de grado alimenticio.

4.2 Composición química proximal

La composición proximal se determinó por los métodos de la AACC, (2002). La humedad de los granos se determinó mediante el método de secado por estufa (método 44-15.02). La proteína se cuantificó a partir del contenido de nitrógeno mediante el método de Kjendahl (método 46-16.01), se usó un factor de conversión de 6.25. El contenido de cenizas se determinó mediante la incineración completa de la muestra (método 08-01.01); el contenido de lípidos se determinó por extracción con éter de petróleo (método 30-25.01); y los carbohidratos se determinaron por diferencia.

4.3 Fibra dietaria

Se determinó el contenido de fibra total, soluble e insoluble mediante el método 32-07.01 descrito por la AACC Internacional (2002).

4.4 Almidón total, almidón resistente, almidón disponible, amilosa y amilopectina

El almidón total se determinó mediante el método 76-13.01, descrito por la AACC (2002), en el cual se utilizó el kit de Megazyme® (Megazyme International Ireland, Ltd. Wicklow, Irlanda). El contenido del almidón resistente se determinó por el método AACC 32-40.01 utilizando un kit de Megazyme®. El contenido de almidón disponible fue calculado por la diferencia entre el almidón total y el almidón resistente.

4.5 Índice de flotación

El índice de flotación se determinó mediante la metodología descrita en la NMX-FF-034-1-2002. Cien granos de cada variedad de maíz se introdujeron por separado en un contenedor con 300 mL de solución NaNO_3 (1.250 g/mL). Se agitaron con el fin de separar los granos y se mantuvieron en reposo durante 1 minuto. El número de granos flotantes indicó la dureza del grano de acuerdo al apartado 7.6.3 de la misma norma.

4.6 Proceso de nixtamalización

Una muestra de un kilogramo de cada tipo de maíz (maíz Cacahuacintle blanco y maíz morado variedad Elotes Occidentales) se sometió a cocción en 2 L de agua y 1 % de hidróxido de calcio (p/p). El tiempo de cocción fue definido según su índice de flotación, es decir, de acuerdo a la dureza del grano, a una temperatura de 94°C. Posteriormente se dejó en reposo por 16 horas a temperatura ambiente. El producto nixtamalizado fue lavado para eliminar el exceso de cal así como el pericarpio remanente.

4.7 Preparación de pozole

El pozole se preparó de la siguiente manera, se dejó hervir el maíz nixtamalizado con agua por 2 horas, se adicionaron 4 niveles de grasa animal (manteca de cerdo), los porcentajes adicionados fueron 0, 6, 8 y 10%. La cantidad de grasa añadida se

definió de acuerdo al contenido de grasa aproximado de la carne de cerdo (4-12%) (Peinado y col., 2009).

Una vez obtenido el pozole, se separó el caldo del grano. El grano se deshidrató en un horno de circulación forzada a 50°C por 12 h. Posteriormente se guardó en bolsas de polietileno hasta su posterior análisis.

4.8 Propiedades térmicas

Se determinaron las propiedades térmicas del maíz, nixtamal y el pozole, en base con la metodología propuesta por Santiago-Ramos y col. (2015) con algunas modificaciones. Se usó un calorímetro diferencial de barrido (DSC) de la marca Mettler Toledo Modelo 821. Se colocó 5.0 mg de la muestra molida y cribada en una malla US 60 (250 μm), en una charola de aluminio, se agregó agua destilada hasta que se alcanzó una humedad de 60%. La charola se selló con una prensa Mettler Toledo (ME-00119410) y sometió a un perfil de temperatura de 30 a 160°C, en una razón de 10°C por minuto.

Se analizaron dos endotermas: gelatinización y fusión de complejos amilosa-lípidos. Dentro de la endoterma de gelatinización se determinaron parámetros como: temperatura inicial (T_{OG}), temperatura pico (T_{pG}), temperatura final de gelatinización (T_{fG}) y entalpía (ΔH_G). En la endoterma de fusión de complejos amilosa-lípidos se determinaron parámetros como: temperatura inicial (T_{ORS5}), temperatura pico (T_{pRS5}), temperatura final de fusión (T_{fRS5}) y entalpía (ΔH_{RS5}).

4.9 Propiedades reológicas del maíz, maíz nixtamalizado y del pozole.

Se siguió la metodología propuesta por Ménera-López y col. (2012) usando un reómetro (Anton Paar Physica Modelo MCR-101, Austria). Se pesaron 3 gramos de la muestra seca (8% humedad inicial), molida y cribada en una malla US 60. La muestra fue suspendida en 18 mL de agua destilada. La mezcla agua-muestra se mantuvo a 50°C por 2 minutos para estabilizar la temperatura y asegurar una dispersión uniforme. Posteriormente se sometió a una isoterma de calentamiento

de 50 a 92°C durante 8.4 minutos, manteniendo por 5 minutos una temperatura de 92°C, finalmente la muestra se enfrió hasta 50°C a -5.8°C/min. Con esta prueba se obtuvieron viscoamilogramas, con los cuales se determinó: temperatura de pastificado (pasting), viscosidad máxima, tiempo y temperatura de viscosidad máxima, viscosidad mínima, viscosidad final y viscosidad de retrogradación (diferencias entre la viscosidad final y máxima).

4.10 Propiedades morfológicas y estructurales del almidón nativo, almidón nixtamalizado y recocido

4.10.1 Microestructura y morfología del gránulo de almidón

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido ambiental ESEM XL30 Philips con módulo de bajo vacío, usando el haz de electrones ajustado a 20kV y 50 μ A aproximadamente. Se tomaron imágenes a 100 y 50 μ m con 450 y 1250 X respectivamente, 1 torr, con un detector GSE con “spotsize” de láser de 4.6 a 5.0 (Figuroa y col., 2013).

4.10.2 Patrón de difracción de rayos X

Se ajustó la humedad de cada una de las muestras a 7% y se colocaron en una superficie de vidrio; se escanearon desde 5 hasta 50° sobre la escala 2θ utilizando un difractómetro de rayos X Rigaku DMAX-2100, el cual opera a 30kV y 16 mA con una radiación de CuKa de $\lambda=1.5405$. Las distancias interplanares (d) de los picos se calcularon con la ecuación de Bragg (Figuroa y col., 2013):

$$n\lambda = 2d \text{ sen } \theta$$

4.10.3 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

Se utilizó un espectrómetro IR (Perkin Elmer, modelo Spectrum Two, Waltham-USA) equipado con ATR (Reflectancia Total Atenuada). El espectro se obtuvo en 24 escaneos entre 600 y 4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} (Santiago-Ramos y col., 2018).

4.11 Análisis estadístico

Se realizaron dos réplicas por tratamiento y dos repeticiones de cada medición. Para la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la materia prima se utilizó un diseño al azar con un arreglo factorial 3x4: las variables evaluadas fueron la variedad del maíz y la concentración de grasa animal. En la evaluación de las propiedades fisicoquímicas del nixtamal se utilizó un diseño unifactorial; mientras que para la evaluación del pozole se utilizó un diseño factorial.

Las diferencias estadísticas en cada una de las variables evaluadas se observaron al aplicarse un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, se evaluó una variable continua (tres variedades de maíz) y una variable numérica (cuatro niveles de grasa), a un nivel de significancia de 95% ($\alpha=0.05$). Se utilizó una prueba Tuckey (comparaciones múltiples) al encontrarse diferencias significativas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Dureza del grano

Para determinar el uso final del grano, la industria considera diferentes factores: color, tamaño y dureza del grano; productos como el pozole, necesitan para su elaboración granos suaves, mientras que otros productos, como harinas de maíz nixtamalizado, requieren para su producción granos intermedios a duros (Bonifacio-Vázquez y col., 2005; Gaytán-Martínez y col., 2006).

En el Cuadro 2 se encuentran los resultados de índice de flotación y su equivalencia en dureza de las variedades utilizadas.

Cuadro 2. Índice de flotación de maíces pozoleros

Variedad	Índice de flotación (%)	Dureza del grano *	Tiempo de cocción en la nixtamalización (min)
Cacahuacintle	99 ± 0.0 ^A	Muy suave	25
Pozolero 1	70.66 ± 1.15 ^C	Suave	30
Pozolero 2	78.33 ± 2.30 ^B	Suave	30

Medias ± DE seguidas de la misma letra no muestran diferencias significativas.

*NMX-FF-034-1-2002

La variedad Pozolero 1 fue la que presentó un menor índice de flotación (70.6 ± 1.15%), seguida de la variedad Pozolero 2 (78.3 ± 2.3%) y finalmente la variedad Cacahuacintle presentó el índice de flotación más alto (99 ± 0.0%), las muestras fueron estadísticamente diferentes entre sí (p<0.05). El índice de flotación representa el número de granos de maíz que flotan en una solución de nitrato de sodio (1.25 g/mL) y de acuerdo con la NMX-FF-034-1-2002 es una determinación indirecta de la dureza del grano. De acuerdo con el apartado 7.6.3 de la misma norma, se clasificó para el maíz Cacahuacintle como un maíz muy suave, mientras que los maíces Pozoleros 1 y 2 se clasificaron como maíces suaves, además de que con el índice de flotación se definió el tiempo de cocción necesario para la

nixtamalización, se incrementó el tiempo de cocción a medida que aumentaba la dureza del grano.

La dureza de los granos de maíz no solo se puede relacionar con las características químicas del grano, sino que también se relaciona con las características físicas. De acuerdo con Gaytán-Martínez y col. (2006) se encuentran correlaciones positivas entre dureza-densidad, dureza-tamaño del gránulo de almidón y dureza-endospermo. El endospermo está conformado por una parte harinosa y otra vítrea, la relación de estas dos fracciones determina la dureza del grano, ya que a mayor fracción harinosa el grano es más suave y a medida que la fracción vítrea aumenta la dureza del grano aumenta.

Salinas y col. (2010) reporta que maíces con endospermo suave se hidratan mejor durante el proceso de nixtamalización en comparación con maíces con endospermo duro, debido a que los gránulos de almidón son más fácilmente alcanzados por el agua.

5.2 Composición química proximal

En el Cuadro 3, se presentan los resultados de la composición proximal de los maíces usados en el presente estudio. El contenido de humedad de los granos se encontró entre $8.92 \pm 0.03\%$ (Pozolero 1) hasta $9.55 \pm 0.23\%$ (Cacahuacintle), no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las muestras. La variedad Cacahuacintle fue la que presentó un mayor porcentaje de humedad en comparación con las dos variedades moradas; Narváez-González y col. (2006) han relacionado el contenido de humedad con la dureza del grano, indicando que a mayor dureza del grano la humedad de este tiende a disminuir debido a la compactación y a la disminución de los espacios intra-granulares del grano. Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado, debido a que la variedad Cacahuacintle es un grano clasificado como muy suave y en el que presenta el mayor contenido de humedad; en cambio la variedad Pozolero 1 se clasifica como suave y presenta menor porcentaje de humedad.

Cuadro 3. Composición proximal de maíces pozoleros

V*	Humedad (%)	Proteína (%)	Lípidos (%)	Cenizas (%)	FDT (%)	CHO (%)
CH	9.55 ± 0.23 ^A	11.10 ± 0.03 ^{AB}	3.54 ± 0.76 ^A	1.41 ± 0.03 ^B	11.43 ± 0.72 ^A	83.94 ± 0.70 ^A
Poz 1	8.92 ± 0.03 ^A	11.87 ± 0.16 ^A	5.32 ± 0.07 ^A	1.73 ± 0.06 ^A	8.31 ± 0.11 ^B	81.06 ± 0.29 ^B
Poz 2	8.98 ± 0.11 ^A	10.56 ± 0.46 ^B	5.36 ± 0.02 ^A	1.64 ± 0.00 ^A	9.31 ± 0.07 ^B	82.42 ± 0.43 ^{AB}

Medias ± DE seguidas de la misma letra por columna no muestran diferencias significativas. Los datos se reportan en base seca. V*: variedad de maíz pozolero. FDT: fibra dietaria total. CHO: carbohidratos, fueron calculados por diferencia: 100-(cenizas + lípidos + proteína, todos en base seca). CH: Cacahuacintle. Poz 1: Pozolero 1. Poz 2: Pozolero 2.

La humedad es uno de los factores que más influye en el comportamiento del grano durante su post-cosecha y por lo tanto en el rendimiento industrial, debido a que un alto contenido de humedad propicia el desarrollo de hongos e insectos que no solo reducen el volumen de maíz almacenado, sino que también afectan la calidad del grano (Blanco y col., 2016). De acuerdo con el Codex Standard 153-1985, el porcentaje máximo de humedad que pueden presentar los granos de maíz es 15.5%, las muestras estudiadas se encuentran por debajo del límite máximo permitido, por lo que se consideran poco susceptibles al ataque de microorganismos.

El contenido de proteínas se encontró en el rango de 10.56 ± 0.46% (Pozolero 2) a 11.87 ± 0.16% (Pozolero 1), estas dos muestras presentaron diferencias significativas entre sí ($p < 0.05$), la muestra de maíz Cacahuacintle no presentó diferencias significativas al tener 11.10 ± 0.03% de proteínas. Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por Vázquez-Carrillo y col. (2013) para maíces criollos y con lo reportado por Narváez-González y col. (2006) para maíces de América Latina. Vázquez-Carrillo y col. (2010) reporta un contenido de proteína en maíz Cacahuacintle de 9.9%, el cual es cercano al valor experimental (11.10 ± 0.03%), para maíz Elotes Occidentales reporta 10.1% de proteínas, los resultados experimentales muestran que para el Pozolero 1 el contenido de proteína (11.87 ± 0.16%) fue mayor al Pozolero 2 (10.56 ± 0.46%), esta diferencia puede explicarse a que este factor se ve influenciado por el genotipo de la variedad, el ambiente y las condiciones de siembra (Paredes-López y col., 2009).

El contenido de lípidos se encontró en el rango de $3.54 \pm 0.76\%$ (Cacahuacintle) y $5.36 \pm 0.02\%$ (Pozolero 2), no se encontraron diferencias significativas entre las muestras estudiadas. El porcentaje de lípidos de las variedades Pozoleras corresponden a lo publicado por Nárvaez y col. (2006), ya que reportan para variedad Elotes Occidentales un porcentaje de 5.3% de lípidos. La variedad Cacahuacintle presentó valores menores ($3.54 \pm 0.76\%$) a lo reportado por el mismo autor (6.4%), sin embargo, Figueroa y col. (2013) reporta valores más bajos de lípidos en la misma variedad (4.35%).

El maíz Pozolero 1 fue la muestra que presentó un mayor contenido de cenizas ($1.73 \pm 0.06\%$), seguido del maíz Pozolero 2 ($1.64 \pm 0.004\%$) y finalmente la variedad Cacahuacintle con un contenido de cenizas ($1.41 \pm 0.03\%$) siendo significativamente diferente a las variedades moradas. Los valores encontrados son similares a lo publicado por Figueroa y col. (2013), ya que variedades moradas presentaron un mayor contenido de cenizas que variedades blancas.

El rango de carbohidratos presentes en las muestras se encuentra de $81.06 \pm 0.29\%$ (Pozolero 1) a $83.94 \pm 0.70\%$ (Cacahuacintle), se presentaron diferencias significativas entre estas dos muestras ($p < 0.05$), mientras que la muestra correspondiente a la variedad Pozolero 2 ($82.42 \pm 0.43\%$) no presentó diferencias estadísticamente significativas con las demás variedades. Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Figueroa y col. (2013), en donde la variedad de maíz Cacahuacintle presentó 84.1% de carbohidratos mientras que la variedad de Pozolero Morado presentó 84.2%. De acuerdo con Méndez-Montealvo (2005) los carbohidratos representan la mayor fracción de los componentes del grano de maíz, integrado principalmente por almidón (amilosa y amilopectina) y polisacáridos (fibra dietética). La cantidad de fibra dietaria corresponde al contenido de carbohidratos de cada una de las muestras, es decir, la variedad Cacahuacintle presentó el mayor contenido de carbohidratos ($83.94 \pm 0.70\%$), lo que se ve reflejado en el contenido de fibra dietaria ($11.43 \pm 0.72\%$), seguido de la variedad Pozolero 2 la cual tuvo $9.31 \pm 0.07\%$ de fibra dietaria, y finalmente, el maíz Pozolero 1 al tener el menor

contenido de carbohidratos también tuvo el menor porcentaje de fibra dietaria ($8.31 \pm 0.11\%$).

5.3 Fibra dietaria

Los valores de fibra dietaria soluble (FDS), insoluble (FDI) y total (FDT) se observan en el Cuadro 4. La variedad de maíz Pozolero 2 presentó el mayor porcentaje de fibra dietaria soluble con $1.09 \pm 0.20\%$, seguido del maíz Cacahuacintle ($1.07 \pm 0.55\%$) y del maíz Pozolero 1 ($0.92 \pm 0.21\%$), no se presentaron diferencias significativas entre las variedades. De acuerdo con Mudgil y col. (2013) la fibra dietaria puede dividirse según su solubilidad en agua. La fibra dietaria soluble está conformada principalmente por pectina, gomas, mucílagos y β -glucanos; en el grano de maíz estos compuestos se encuentran principalmente en pericarpio, en paredes celulares del endospermo y en menor medida, en el germen (FAO, 1993). La importancia de la FDS reside en que al tener la habilidad de absorber agua incrementan viscosidad y tienden a formar geles, por lo tanto proveen lubricación al contenido del tracto intestinal; además de que su fermentación por la microbiota del colon es mayor comparada con la fermentación que sufre la fibra dietaria insoluble (Mudgil., 2013).

Cuadro 4. Fibra dietaria en maíces pozoleros

Variedad	FDI (%)	FDS (%)	FDT (%)
Cacahuacintle	10.36 ± 1.28^A	1.07 ± 0.55^A	11.43 ± 0.72^A
Pozolero 1	7.38 ± 0.33^A	0.92 ± 0.21^A	8.31 ± 0.11^B
Pozolero 2	8.22 ± 0.13^A	1.09 ± 0.20^A	9.31 ± 0.07^B

Medias \pm DE seguidas de la misma letra no muestran diferencias significativas. Los datos se reportan en base seca. FDI: fibra dietaria insoluble. FDS: fibra dietaria soluble. FDT: fibra dietaria total.

En cuanto a la fibra dietaria insoluble, la variedad Cacahuacintle fue la que mostró un mayor porcentaje ($10.36 \pm 1.28\%$), seguida del Pozolero 2 ($8.22 \pm 0.13\%$) y por último el maíz Pozolero 1 fue el que mostró menor porcentaje de FDI ($7.38 \pm 0.33\%$), no se presentaron diferencias significativas entre variedades. Este porcentaje de fibra corresponde principalmente a compuestos insolubles en agua, como lo es la

celulosa y la lignina (Mudgil y col., 2013). Estos compuestos se encuentran principalmente en el pericarpio del grano (Ortiz, 2006). De acuerdo con Jiang y col. (2019), el almidón resistente es insoluble en agua, por lo que podría considerarse parte de la fibra dietaria insoluble. La fibra dietaria insoluble es caracterizada por su porosidad y su baja densidad, las cuales están asociadas a una disminución del tránsito intestinal (Mudgil y col., 2013). Durante la nixtamalización del maíz, las paredes celulares y algunos componentes de la fibra dietaria del endospermo se vuelven frágiles, lo que facilita su remoción del grano quedando en el nejayote, teniendo como consecuencia una disminución de fibra dietaria insoluble en el grano y un aumento de fibra soluble (Paredes y col., 2006). Una vez nixtamalizados los granos de maíz, se midió el porcentaje de sólidos presentes en el nejayote, los cuales se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Contenido de sólidos en nejayote

Variedad	Sólidos (%)
Cacahuacintle	2.01 ± 0.12 ^{AB}
Pozolero 1	1.71 ± 0.08 ^B
Pozolero 2	2.30 ± 0.23 ^A

Medias ± DE seguidas de la misma letra no muestran diferencias significativas.

La variedad Cacahuacintle fue aquella que presentó mayor contenido de FDI (11.43 ± 0.72%), por lo que se esperaba que tuviera un mayor porcentaje de sólidos en nejayote; no obstante, tuvo 2.01 ± 0.12% de sólidos, siendo el maíz Pozolero 2 la variedad que tuvo un mayor contenido de sólidos en nejayote (2.30 ± 0.23%), sin embargo, no se mostraron diferencias significativas entre estas dos muestras. Por otro lado, el maíz Pozolero 1 mostró menor contenido de sólidos (1.71 ± 0.08%), lo que concuerda con su contenido de FDI (7.38 ± 0.33%). Si bien, en la nixtamalización ocurre una degradación del pericarpio (Méndez-Montevalvo y col., 2006), no necesariamente hay una pérdida total de éste, lo que explicaría los resultados de la variedad Cacahuacintle.

En el contenido de fibra dietaria total se mostró el mismo comportamiento que en FDI, la variedad Cacahuacintle tuvo el mayor contenido con 11.43 ± 0.72%, seguido

del maíz Pozolero 2 ($9.31 \pm 0.07\%$) y finalmente el maíz Pozolero 1 ($8.31 \pm 0.11\%$), estas dos últimas muestras presentaron diferencias estadísticamente significativas con la variedad Cacahuacintle. Los resultados experimentales corresponden al rango de fibra dietaria publicado por Méndez-Montealvo y col. (2005), en donde evalúan diferentes variedades de maíz, se reporta un rango de 7.1% a 13.1% de fibra dietaria. Por otro lado, Sotelo y col. (2007) reportan valores de fibra dietética para maíz pozolero en granos crudos de 12.18%, el cual es cercano al contenido de FDT de la variedad Cacahuacintle, la cual es la variedad característica para elaborar pozole. El contenido y composición de la fibra dietaria varía debido a factores como lo es su grado de madurez, la variedad o el tratamiento tecnológico al que esté expuesto el grano, además, dependen del método de análisis y si hay una remoción del pericarpio durante el tratamiento (Ortiz, 2006).

5.4 Almidón total, almidón resistente, almidón disponible, amilosa y amilopectina.

En el Cuadro 6 se muestran los resultados de almidón disponible, almidón resistente y almidón total de las tres variedades estudiadas. El almidón disponible se encontró en un rango de $49.63 \pm 1.01\%$ (Pozolero 1 crudo) a $77.31 \pm 0.74\%$ (Cacahuacintle con 10% de grasa añadida), las muestras presentaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Respecto al almidón resistente (AR) se encontraron porcentajes desde $0.57 \pm 0.09\%$ (Cacahuacintle crudo) hasta $3.59 \pm 0.08\%$ (Pozolero 2, 8% de grasa añadida), las muestras con mayor contenido de grasa añadida mostraron diferencias significativas respecto a las muestras nixtamalizadas y crudas.

La muestra cruda de la variedad Cacahuacintle presentó el menor contenido de almidón resistente ($0.57 \pm 0.09\%$), en el maíz Pozolero 1 el contenido de AR en la muestra cruda fue casi tres veces mayor a lo encontrado en la variedad blanca ($1.52 \pm 0.23\%$), mientras que la muestra cruda del maíz Pozolero 2 mostró valores similares al Pozolero 1 (muestra cruda) con un contenido de AR de $1.47 \pm 0.41\%$. De las muestras crudas, la variedad con mayor almidón resistente fue el maíz

Pozolero 1 ($1.52 \pm 0.23\%$), seguido del maíz Pozolero 2 ($1.47 \pm 0.41\%$) y finalmente la variedad con menor contenido de AR fue el maíz Cacahuacintle con $0.57 \pm 0.09\%$, a pesar de no encontrarse diferencias estadísticamente significativas, se observó una marcada diferencia entre variedades moradas y la variedad blanca. Los resultados obtenidos de los maíces Pozoleros corresponden a lo reportado por Santiago-Ramos y col. (2015), en donde para maíz crudo de endospermo duro se obtuvo 1.54% de almidón resistente. Por otro lado, Sotelo y col. (2007) reportan 0.42% de almidón resistente en maíz pozolero, el cual es cercano al valor encontrado en maíz Cacahuacintle. La diferencia del contenido de AR se atribuye principalmente a la variedad del maíz. El almidón resistente presente en muestras crudas se debe a la combinación de almidón resistente tipo 1 (almidón físicamente inaccesible) y tipo 2 (almidón nativo) (Santiago-Ramos y col., 2015).

Cuadro 6. Almidón disponible, almidón resistente y almidón total en muestras de maíces pozoleros

Variedad	Tratamiento	Almidón disponible (%)	Almidón resistente (%)	Almidón total (%)
CH	Crudo	65.66 ± 7.38 ^{AB,ab}	0.57 ± 0.09 ^{E,c}	66.23 ± 7.39 ^{BC,b}
	Nixt	55.34 ± 1.79 ^{BCD,b}	1.01 ± 0.12 ^{CE,c}	56.35 ± 1.91 ^{CD,b}
	0%	57.48 ± 0.19 ^{BCD,b}	2.53 ± 0.01 ^{ABCD,b}	60.01 ± 0.20 ^{BCD,b}
	6%	58.71 ± 4.35 ^{BCD,b}	2.21 ± 0.17 ^{ABCD,b}	60.93 ± 4.18 ^{BCD,b}
	8%	59.53 ± 2.82 ^{BCD,b}	2.75 ± 0.01 ^{ABC,b}	62.28 ± 2.81 ^{BCD,b}
	10%	77.31 ± 0.74 ^{A,a}	3.46 ± 0.45 ^{A,a}	80.78 ± 0.28 ^{A,a}
Poz 1	Crudo	49.63 ± 1.01 ^{D,c}	1.52 ± 0.23 ^{BCDE,c}	51.15 ± 1.25 ^{D,c}
	Nixt	51.71 ± 4.34 ^{CD,c}	1.82 ± 0.30 ^{BCDE,bc}	53.54 ± 4.04 ^{CD,c}
	0%	51.29 ± 0.1793 ^{CD,c}	2.58 ± 0.69 ^{ABC,bc}	53.88 ± 0.51 ^{CD,c}
	6%	49.89 ± 3.98 ^{D,c}	3.01 ± 0.07 ^{ABC,b}	52.90 ± 3.91 ^{CD,c}
	8%	61.25 ± 0.04 ^{BCD,b}	3.52 ± 0.13 ^{A,a}	64.78 ± 0.17 ^{BCD,b}
	10%	68.70 ± 0.42 ^{A,ba}	2.99 ± 0.23 ^{ABC,b}	71.70 ± 0.66 ^{A,ba}
Poz 2	Crudo	65.33 ± 1.27 ^{A,ba}	1.47 ± 0.41 ^{CDE,c}	66.81 ± 1.68 ^{ABC,a}
	Nixt	62.24 ± 5.05 ^{BCD,a}	2.47 ± 0.56 ^{ABCD,b}	64.72 ± 5.62 ^{BCD,a}
	0%	64.19 ± 2.59 ^{ABC,a}	2.49 ± 0.29 ^{ABCD,b}	66.68 ± 2.88 ^{BC,a}
	6%	68.19 ± 0.33 ^{Ab,a}	2.65 ± 0.47 ^{ABC,b}	70.85 ± 0.14 ^{A,ba}
	8%	58.70 ± 2.70 ^{BCD,a}	3.59 ± 0.08 ^{A,a}	62.30 ± 2.62 ^{BCD,a}
	10%	67.65 ± 6.18 ^{AB,a}	3.06 ± 0.96 ^{AB,ab}	70.71 ± 7.15 ^{A,ba}

Medias \pm DE seguidas de la misma letra no muestran diferencias significativas. Letras mayúsculas indican diferencias entre los tratamientos, letras minúsculas indican diferencias

entre muestras de la misma variedad. CH: Cacahuacintle. Poz 1: Pozolero 1. Poz 2: Pozolero 2.

En la Figura 4 se observa que el tratamiento así como la variedad tuvieron un efecto significativo en la cantidad de almidón resistente (AR) de cada muestra ($p < 0.05$), ya que a medida que aumenta el contenido de grasa añadida se observó un aumento en la cantidad de este tipo de almidón.

Se observó que el maíz Cacahuacintle presentó un mayor incremento de AR en todos los tratamientos, ya que al someter la muestra cruda a un proceso de nixtamalización, la cantidad de AR se incrementó a $1.01 \pm 0.12\%$. En las muestras sometidas a cocción con grasa añadida de la misma variedad se observó un incremento constante, excepto en la muestra con 6% de grasa añadida en donde hubo una disminución de AR ($2.21 \pm 0.17\%$) respecto a dichas muestras; en la muestra con mayor contenido de grasa (10%) se obtuvo un mayor contenido de almidón resistente ($3.46 \pm 0.45\%$), se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre esta última muestra y el resto de la misma variedad.

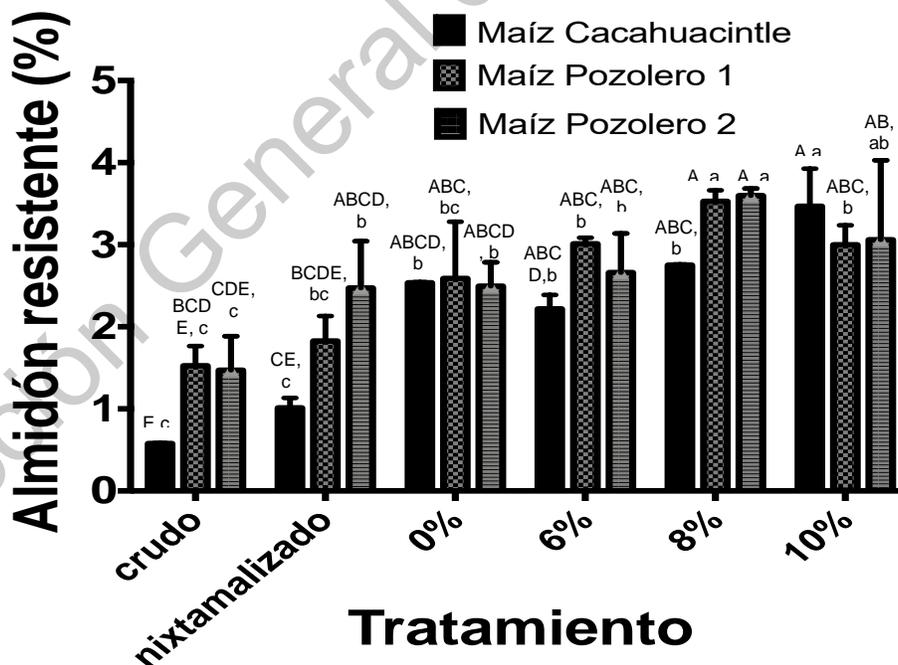


Figura 4. Almidón resistente en maíces pozoleros después del proceso de cocción adicionado con grasa animal

En el maíz Pozolero 1, el menor contenido de AR se encontró en la muestra cruda ($1.52 \pm 0.23\%$), se observó un incremento en el contenido de almidón resistente al someterlo a nixtamalización y a una cocción con grasa añadida. La muestra en la que se encontró un mayor contenido de AR fue aquella con 8% de grasa de cerdo ya que tuvo $3.52 \pm 0.13\%$ de almidón resistente, más del doble del contenido inicial en la muestra cruda, se encontraron diferencias significativas entre la muestra con 8% de grasa y el resto de las muestras de la misma variedad.

El maíz Pozolero 2 mostró un comportamiento similar al maíz Pozolero 1, partiendo de $1.47 \pm 0.41\%$ de AR en la muestra cruda y con un aumento del mismo al aplicarse los tratamientos, la muestra con 8% de grasa añadida fue la que presentó un mayor contenido de AR ($3.59 \pm 0.08\%$), por lo que se presentaron diferencias significativas entre estas dos muestras (Pozolero 2 crudo y Pozolero 2 8% de grasa).

Al someter las muestras crudas a una nixtamalización se presentó un incremento en el contenido de almidón resistente, el mayor incremento se observó en la variedad Cacahuacintle, ya que se incrementó de 0.57% (muestra cruda) a 1.01% (muestra nixtamalizada); el maíz Pozolero 1 tuvo 1.82% mientras que el Pozolero 2 mostró un 2.47% de almidón resistente en la muestra nixtamalizada; los resultados concuerdan con lo reportado por Figueroa y col., (2016) y Santiago-Ramos y col. (2015), el incremento en AR de las muestras se puede atribuir a la formación almidón resistente tipo 3 (almidón retrogradado), AR4 (almidón modificado químicamente) debido a la adición de hidróxido de calcio durante la nixtamalización y AR5, el cual se refiere a la formación de complejos amilosa-lípidos, que se ve favorecida por el tiempo de reposo de los granos en el caldo de cocción durante la nixtamalización. Jayakody y Hoover (2008) reportan que solo el maíz tiene la habilidad de formar complejos amilosa-lípidos durante el annealing, debido a la entrada de los lípidos superficiales del grano de maíz al interior del gránulo, y una vez en el interior, la energía impartida a los ácidos grasos incrementa la movilidad de éstos, lo que facilita la interacción con la hélice de amilosa.

Independientemente de la variedad, las muestras sometidas a cocción y adición de grasa animal mostraron un comportamiento similar, se observó un aumento de almidón resistente al aumentar la concentración de grasa añadida. En la variedad Cacahuacintle se llegó a un máximo de AR ($3.46 \pm 0.45\%$) en una concentración de grasa del 10%, mientras que en las variedades Pozoleras se observó un máximo de AR en una concentración de grasa de 8%, $3.52 \pm 0.13\%$ de AR para maíz Pozolero 1 y $3.59 \pm 0.08\%$ de AR para Pozolero 2, no se presentaron diferencias significativas entre estas tres muestras. Si bien en literatura no se encuentran estudios similares de formación de almidón resistente en maíz pozolero con grasa añadida, Mariscal-Moreno y col. (2017) estudiaron la formación de almidón resistente en tamales, durante la elaboración de los mismos se añadió grasa vegetal y se encontró un contenido de almidón resistente en el producto final de 3.2%; de acuerdo con los autores, el almidón resistente total fue una mezcla de AR3 y AR5. El AR3 es formado como consecuencia de la retrogradación de la amilopectina, mientras que la formación de AR5 puede ser explicada por la adición de grasa vegetal en la formulación de los tamales, además de que la nixtamalización combina tiempo y temperatura para que se favorezca la formación de complejos amilosa-lípidos (Mariscal-Moreno y col. 2017). Estos resultados pueden tomarse como base para explicar los resultados del presente estudio, ya que el aumento de almidón resistente en las muestras con mayor contenido de grasa animal añadida se puede atribuir entonces a la formación de complejos amilosa-lípidos, la cual dependería de la cantidad de grasa añadida. Para que el cuerpo humano adquiriera los beneficios de la ingesta de AR, se ha reportado que una ingesta estimada de 10-20% del total de carbohidratos consumidos diariamente debe ser en forma de AR, sin embargo, la mayoría de los productos comerciales contienen menos del 5%. Sin embargo, un consumo superior al 5% ha demostrado un aumento de oxidación de lípidos en el organismo, por lo tanto disminuye la acumulación de grasa en un entorno a largo plazo (Dupuis y col., 2014). A pesar de eso, el porcentaje de AR encontrado en pozole (3.4-3.5%) es superior al reportado para tortillas (2.2-3.12%) (Bello-Pérez y col., 2006) y para tamales (3.2%) (Mariscal-Moreno y col., 2017).

De acuerdo con Obiro y col. (2013), la formación de complejos amilosa-lípidos (AR5) puede verse afectada por diferentes factores: tipo de almidón, contenido de agua del almidón, grado de polimerización del almidón, proporción de almidón-ligando y la estructura de la molécula que interactúa con la amilosa. El ligando utilizado en el presente estudio fue la manteca de cerdo, Ripoche y Guillard (2000) reportan que en la composición de la manteca de cerdo predominan ácidos grasos monoinsaturados como el ácido oleico (C18:1), ácidos grasos saturados como el ácido palmítico (C16:0) y el ácido esteárico (C18:0) y en menor cantidad ácidos grasos poliinsaturados como el ácido linoleico (C18:2). Dupuis y col. (2014) indican que la presencia de dobles enlaces en la estructura de los ácidos grasos mejora la habilidad para formar complejos amilosa-lípidos, por lo que los complejos amilosa-lípidos (AR5) formados durante la cocción del pozole pueden deberse principalmente a la interacción del ácido oleico (C18:1) y el ácido linoleico (C18:2) con las cadenas de amilosa. Por otro lado Obiro y col. (2013) reporta que ácidos grasos con cadenas cortas favorecen la formación de complejos amilosa-lípidos y que la formación de estos complejos aumenta con la cantidad de ácidos grasos utilizados, encontrándose como concentración óptima una proporción de 10:1 (amilosa:ácido graso); esto podría explicar que la mayor formación de almidón resistente se haya dado en un rango de 8-10% de grasa añadida.

En cuanto al almidón total, las muestras se comportaron similar que en almidón disponible, ya que éste es el mayoritario en las muestras estudiadas. Las muestras que presentaron mayor contenido de almidón total fueron aquellas con mayor contenido de grasa añadida, la muestra de Cacahuacintle con 10% de grasa tuvo $80.78 \pm 0.28\%$ de almidón total, seguido de Pozolero 1 (10% grasa añadida) con $71.70 \pm 0.66\%$ y las muestras de Pozolero 2 (6% y 10% de grasa añadida) con $70.85 \pm 0.14\%$ y $70.71 \pm 7.15\%$ de almidón total respectivamente, no presentaron diferencias significativas entre sí, pero si presentaron diferencias significativas con el resto de las muestras estudiadas.

En el contenido de almidón disponible y almidón total no se encontró una tendencia en función al tratamiento aplicado ni en función a la variedad estudiada, sin

embargo, se observó que las muestras con mayor porcentaje de grasa animal añadida fueron aquellas que mostraron mayor cantidad de almidón disponible, almidón resistente y almidón total. Estudios en tortilla (Santiago-Ramos y col., 2015) indican que la formación de almidón resistente tiene un efecto en el almidón disponible, al disminuirlo; sin embargo, en los resultados obtenidos no se muestra este comportamiento.

5.5 Propiedades térmicas del maíz, maíz nixtamalizado y del pozole

En el Cuadro 7 se presentan las endotermas de gelatinización de las tres variedades de maíz estudiadas. Se observó que independientemente de la variedad de maíz la temperatura a la cual iniciaba la endoterma iba aumentando al aumentar el contenido de grasa del tratamiento. El maíz Cacahuacintle fue la variedad que presentó temperaturas más altas para dicha endoterma, presentado rangos desde 50°C (muestra con 0% grasa añadida) hasta 75.28°C (muestra con 8% grasa añadida). Seguido del maíz Pozolero 1, que presentó rangos desde 53.75°C (muestra con 0% de grasa añadida) hasta 69.5°C (muestra nixtamalizada). Finalmente la variedad que mostró temperaturas menores a esta primera endoterma fue la variedad Pozolero 1, en la cual se encontraron temperaturas desde 46.93°C (muestra nixtamalizada) hasta 62.57°C (muestra con 10% de grasa añadida).

La muestra nixtamalizada de Cacahuacintle mostró una endoterma de gelatinización que inició en 69.77°C y terminó en 88.6°C, teniendo como pico una temperatura de 74.38°C y una entalpía de gelatinización de 6.66 J/g. La muestra nixtamalizada de Pozolero 1 mostró temperaturas similares a la variedad blanca, la endoterma de gelatinización se observó desde 69.5°C hasta 85.85°C, teniendo como temperatura pico 74.74°C y una entalpía de 6.02 J/g. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Mariscal-Moreno y col. (2015), en donde muestras nixtamalizadas mostraron un rango de temperatura en su endoterma de gelatinización de 63°C a 81°C y entalpía de gelatinización de 4.11 J/g. De acuerdo con Santiago-Ramos y col. (2017) una endoterma de gelatinización generalmente se presenta en un rango de temperaturas de 61.42°C (temperatura inicio) a 77.73°C

(temperatura final), con un pico de temperatura de 68.8°C y una entalpía de 7.12 J/g, datos que concuerdan con los resultados presentados. Según Coello y Garcés (2012), la temperatura inicial de gelatinización representa la pérdida de ordenamiento molecular del gránulo de almidón, en donde ocurre un rompimiento de puentes de hidrógeno de la región amorfa del mismo, lo que permite que el agua se asocie a los grupos hidroxilos libres; por otro lado la temperatura pico de gelatinización indica cuando los gránulos de almidón se encuentran hidratados, lo que dará paso a la ruptura del mismo; finalmente la temperatura final de gelatinización es la temperatura a la cual el gránulo de almidón se encuentra desintegrado.

Cuadro 7. Propiedades térmicas de maíz pozolero adicionado con diferentes cantidades de grasas

Variedad	Tratamiento	T _o (°C)	T _p (°C)	T _e (°C)	ΔH (J/g)
CH	Nixt	69.77	74.38	88.6	6.66
	0	50	62.73	71.74	2.05
	6	53.77	57.21	60.31	1.04
	8	75.28	75.84	78	0.13
	10	ND	ND	ND	ND
Poz 1	Nixt	69.5	74.74	85.85	6.02
	0	53.75	62.26	68.89	0.69
	6	57.46	65.91	73.69	1.61
	8	59.18	68.7	79.27	2.7
	10	54.24	65.37	74.31	2.7
Poz 2	Nixt	46.93	54.4	60.45	0.44
	0	47.88	58.72	67.7	3.3
	6	55.15	64.88	76.54	3.67
	8	54.7	67.34	78.97	5.14
	10	62.57	68.64	77.1	1.14

ND: No detectado; T_o: temperatura inicial de gelatinización; T_p: temperatura pico de gelatinización; T_e: temperatura final; ΔH: entalpía; CH: Cacahuacintle; Poz 1: Pozolero 1; Poz 2: Pozolero 2; Nixt: nixtamalizado.

La muestra nixtamalizada de Pozolero 2 mostró rangos de temperatura más bajos a los encontrados en las otras dos variedades y con lo reportado por la literatura, tuvo una temperatura inicial de 46.93°C y una temperatura final de 60.45°C.

Las muestras de Cacahuacintle tratadas con grasa añadida mostraron una temperatura de gelatinización menor a lo reportado por literatura. Se observó que a medida que se aumentaba la cantidad de grasa añadida la temperatura inicial así como la temperatura pico iba en aumento. Lo mismo ocurrió en las muestras tratadas con grasa de la variedad Pozolero 1 y Pozolero 2. La disminución de las temperaturas de la endoterma de gelatinización se puede atribuir a que durante el annealing se lleva a cabo una gelatinización de más del 70% del almidón presente en el grano y la endoterma que se observa en los termogramas no corresponde a la gelatinización del almidón, sino que corresponde a la fusión de cadenas de amilopectina retrogradadas (Santiago-Ramos y col., 2017). Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Mariscal-Moreno y col. (2017), en donde estos valores de temperatura (endoterma de retrogradación) se observan en un producto del maíz, las tortillas. El aumento de la cantidad de grasa añadida causó un aumento en la temperatura de disociación de amilopectina retrogradada, esto puede explicarse a que la adición de lípidos a la matriz retarda la retrogradación (Yu y col., 2018).

En cuanto a la entalpía de las muestras tratadas con grasa del maíz Cacahuacintle se observó que a medida que aumenta el contenido de grasa, la entalpía va disminuyendo, es decir, se necesita menor cantidad de energía para disociar las cadenas de amilopectina retrogradada. Por otro lado, en las variedades Pozolero 1 y Pozolero 2 se observó un aumento de entalpía a medida que incrementaba la concentración de grasa añadida, lo que indica que, al contrario de la variedad Cacahuacintle, se necesita una mayor energía para disociar las cadenas de amilopectina retrogradada, es decir, se necesita una mayor energía para disociar almidón resistente tipo 3, por lo que se asumiría un aumento de AR3 al aumentar el contenido de grasa en las muestras. De acuerdo a Mariscal-Moreno y col. (2017), la retrogradación del almidón se verá influenciada por el acondicionamiento de la muestra, su procesamiento y el almacenamiento que se le dé. Además, este tipo de AR depende de la cantidad y de la longitud de cadenas de amilosa, ya que a mayor cantidad y longitud se tiene una mayor cantidad de AR3, por lo que habría de evaluarse el contenido de amilosa y amilopectina de cada variedad. Otro factor que

influye en dicha formación son los ciclos de enfriamiento y calentamiento hechos durante el almacenamiento, así como el tiempo y temperatura de éste (Fuentes-Zaragoza y col., 2010; Dupuis y col., 2014; Tacer-Caba y col., 2018).

En el Cuadro 8 se presenta la segunda endoterma encontrada en los termogramas. Se observa que independientemente de la variedad, las muestras con grasa añadida (6%, 8% y 10%) mostraron una segunda endoterma, correspondiente a la fusión de complejos amilosa-lípidos tipo I. De acuerdo con Obiro y col. (2013), se pueden observar tres endotermas durante la fusión de los complejos amilosa-lípidos. La primera, consiste en los complejos tipo I, los cuales tienen una temperatura de fusión inferior a 100°C y consisten en una estructura parcialmente ordenada con regiones cristalinas poco distinguidas.

El rango de temperaturas en el que se encontró esta endoterma es similar en las tres variedades. En las muestras de maíz Cacahuacintle se observó que a medida que se aumenta el contenido de grasa en el tratamiento se encuentra una disminución de la temperatura pico de fusión así como de la temperatura final de la endoterma. En el maíz Pozolero 1, la muestra con 6% de grasa presentó una menor temperatura pico de fusión de complejos tipo I (86.55°C), seguida de la muestra con 10% de grasa (87.07°C) y la muestra con 8% de grasa fue la que presentó una mayor temperatura pico con 87.17°C. Por otro lado el maíz Pozolero 2 mostró un pico de temperatura de fusión entre 86.95°C (10% grasa) y 88.18 (6% grasa). El rango de temperaturas observado para la endoterma correspondiente a la fusión de complejos amilosa-lípidos tipo I corresponde a lo reportado en literatura por Figueroa y col. (2016), en donde se observó una temperatura inicial de esta endoterma en 85.78°C y una temperatura final de 96.96°C, con una temperatura pico en 90.73°C para maíz Cacahuacintle (masa); Mariscal-Moreno y col. (2017) reportan resultados similares a lo observado en este estudio, indica que la formación de los complejos de amilosa-lípidos tipo I se da después de la gelatinización del almidón en presencia de lípidos propios del grano o añadidos. De acuerdo con Figueroa y col. (2016), los complejos tipo I son producidos a una temperatura de 80-

90°C y como resultado se tiene la formación de segmentos helicoidales individuales orientados al azar.

Respecto a la entalpía correspondiente a la fusión de complejos amilosa-lípidos tipo I, la muestra de maíz Cacahuacintle que mostró una entalpía más alta fue aquella con 8% de grasa añadida (0.39 J/g), seguida de la muestra con 10% de grasa (0.21 J/g) y por último la muestra con menor contenido de grasa (6%) con 0.14 J/g. Se observó que en la variedad Pozolero 1 la entalpía de fusión no presentó cambios entre los tratamientos de esta variedad (0.14 J/g). Por otro lado en la variedad Pozolero 2 se observó que a medida que se aumentó la concentración de grasa añadida se encontró una disminución de la entalpía de fusión de complejos, las entalpías encontradas fueron 0.4 J/g, 0.12 J/g y 0.0078 J/g correspondientes a las muestras con 6%, 8% y 10% respectivamente. Figueroa y col. (2016) reporta entalpías de 0.03 J/g; mientras que Mariscal-Moreno y col. (2017) reporta un promedio de 0.16 J/g, valores similares a los observados en las muestras tratadas con grasa de las tres variedades, las posibles diferencias que se puedan encontrar entre las entalpías se atribuyen principalmente a la variedad de maíz analizada. De acuerdo con la entalpía de la muestra Cacahuacintle con 8% de grasa añadida, se sugiere que al requerir mayor energía sea ésta la muestra que contenga mayor cantidad de complejos amilosa-lípidos tipo I. Según lo reportado por Santiago-Ramos y col. (2018), los granos más suaves muestran una mayor entalpía de disociación de complejos amilosa lípidos comparado con granos de mayor dureza, los resultados obtenidos corresponden a lo reportado por dicho autor, ya que el maíz Cacahuacintle fue la variedad que mostró mayores entalpías de disociación y fue la variedad con mayor suavidad de las tres estudiadas.

Cuadro 8. Propiedades térmicas de fusión de complejos amilosa-lípidos tipo I de maíces pozoleros

Variedad	Tratamiento	T _o (°C)	T _p (°C)	T _e (°C)	ΔH (J/g)
CH	Nixt	ND	ND	ND	ND
	0	ND	ND	ND	ND
	6	85.63	94.91	98.87	0.14
	8	84.67	88.16	98.26	0.39
	10	85.67	88.07	92.92	0.21
Poz 1	Nixt	ND	ND	ND	ND
	0	ND	ND	ND	ND
	6	83.92	86.55	94.48	0.14
	8	84.85	87.17	91.17	0.14
	10	84.64	87.01	91.61	0.14
Poz 2	Nixt	ND	ND	ND	ND
	0	ND	ND	ND	ND
	6	84.64	88.18	96.62	0.4
	8	85.09	88.15	92.23	0.12
	10	84.35	86.95	90.18	0.0078

ND: No detectado; T_o: temperatura inicial de gelatinización; T_p: temperatura pico de gelatinización; T_e: temperatura final; ΔH: entalpía; CH: Cacahuacintle; Poz 1: Pozolero 1; Poz 2: Pozolero 2; Nixt: nixtamalizado.

En el cuadro 9 se encuentran los datos correspondientes a la endoterma de fusión de complejos amilosa-lípidos del tipo II observados únicamente en las muestras con grasa añadida. Este tipo de complejos tienen temperaturas de fusión superiores a 100 °C, y éstos son subdivididos en tipo II a y II b, difieren uno del otro en el grado de cristalinidad, el tipo II b se caracteriza por tener una temperatura de fusión mayor a 121°C (Obiro y col., 2013).

En la variedad Cacahuacintle, la muestra con 6% de grasa fue la única que presentó las dos endotermas correspondientes a la fusión de complejos amilosa-lípidos tipo II a y II b. La primera endoterma presentó una temperatura inicial de 106.77°C, una temperatura pico de 109.39°C y una temperatura final de 128.77°C, con una entalpía de 0.44 J/g; la segunda endoterma se observó en un rango de temperatura de 131.33°C a 136.45°C, teniendo un pico de temperatura en 132.62°C y una entalpía de 0.03 J/g. Por otro lado, la muestra con 10% de grasa de la misma variedad

presentó la endoterma correspondiente a los complejos tipo II b en un rango de temperatura de 136.37°C a 139.85°C, con una entalpía de fusión de 0.1 J/g.

Cuadro 9. Propiedades térmicas de fusión de complejos amilosa-lípidos tipo II de maíces pozoleros

V	T	Interacción amilosa-lípidos Tipo II a				Interacción amilosa-lípidos Tipo II b			
		T _o (°C)	T _p (°C)	T _e (°C)	ΔH (J/g)	T _o (°C)	T _p (°C)	T _e (°C)	ΔH (J/g)
CH	6	106.77	109.39	128.77	0.44	131.33	132.62	136.45	0.03
	8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	10	ND	ND	ND	ND	135.35	136.37	139.85	0.1
Poz 1	6	112.01	122.65	130.85	0.33	ND	ND	ND	ND
	8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Poz 2	6	110.58	119.79	127.51	0.27	ND	ND	ND	ND
	8	ND	ND	ND	ND	121.95	122.92	124.5	0.0056
	10	114.42	125.04	132.76	0.53	141.67	145	146.51	0.0063

V: variedad; T: tratamiento; ND: No detectado; T_o: temperatura inicial de gelatinización; T_p: temperatura pico de gelatinización; T_e: temperatura final; ΔH: entalpía; CH: Cacahuacintle; Poz 1: Pozolero 1; Poz 2: Pozolero 2; Nixt: nixtamalizado.

La variedad de maíz Pozolero 1 mostró una sola endoterma de complejos, correspondiente al tipo II a (muestra 6% grasa), en un rango de temperatura de 112.01°C a 130.85°C, mostrando una entalpía de fusión de 0.33 J/g. Finalmente, en la variedad de maíz Pozolero 2, la muestra con 6% de grasa añadida mostró una endoterma correspondiente a la fusión de complejos tipo II a en un rango de temperatura de 110.58°C a 127.51°C, mientras que la muestra con 8% de grasa presentó la endoterma característica a los complejos II b (121.95°C-124.5°C); finalmente la muestra con mayor cantidad de grasa (10%) mostró las dos endotermas correspondientes a los tipos II a y II b de complejos amilosa-lípidos.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Mariscal-Moreno y col. (2017) en donde se encontró una temperatura pico de disociación de complejos amilosa-lípidos correspondientes al tipo II de 119°C en tamales nixtamalizados de manera tradicional y una entalpía de disociación de 0.062 J/g, por otro lado Santiago-Ramos y col. (2017) reporta una temperatura pico de 114°C para granos suaves sometidos a nixtamalización la cual corresponde a la temperatura observada

en la variedad más suave (Cacahuacintle), dicho autor reporta una entalpía de disociación de 0.27 J/g. Las entalpías encontradas en las muestras estudiadas son mayores a lo reportado en literatura, estas diferencias se pueden atribuir al método de procesamiento (nixtamalización y adición de grasa), a la variedad de maíz utilizada así como al producto final, ya que los valores reportados en literatura corresponden a tamales mientras que en el presente estudio corresponden a pozole.

La muestra con 6% de grasa añadida de la variedad Cacahuacintle fue la que mostró una menor entalpía de disociación de complejos amilosa-lípidos tipo I, lo que indica menor energía para disociar estos complejos, es decir, menor presencia de éstos (Cuadro 9); sin embargo fue la única muestra de esta variedad que mostró endotermas de disociación de complejos tipo II a y tipo II b. De acuerdo con Santiago-Ramos y col. (2017), puede ocurrir una transformación de complejos tipo I (estructura menos ordenada) a tipo II (estructura más ordenada) cuando se someten a temperaturas de procesamiento altas ($>90^{\circ}\text{C}$) y a annealing; por lo tanto, se podría inferir que en esta muestra hubo una mayor transformación de complejos amilosa-lípidos del tipo I al tipo II. Este comportamiento se observó en la variedad Pozolero 2 (muestra con 10% de grasa), ya que ésta fue la muestra con menor entalpía de disociación correspondiente a los complejos amilosa-lípidos tipo I, sin embargo mostró las dos endotermas correspondientes a la disociación de complejos amilosa-lípidos tipo IIa y II b. Dentro de esta misma variedad (Pozolero 2), se observó que a medida que se aumentó el contenido de grasa en las muestras se observó un incremento en la entalpía de disociación, lo que se atribuye principalmente a un aumento de la cantidad de complejos amilosa-lípidos tipo II.

5.6 Propiedades reológicas del maíz, maíz nixtamalizado y del pozole

El efecto de la adición de grasa en las propiedades reológicas de variedades de maíz característicos para la elaboración de pozole se muestra en la Figura 5. Se observó que a mayor concentración de grasa se obtuvo un aumento en la temperatura de pasta, por ende un mayor tiempo para alcanzar la misma (Cuadro

10). No se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre tratamientos ni entre las variedades de Pozolero 1 y 2, sin embargo, en la variedad Cacahuacintle se tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el tratamiento con 0% de grasa y el tratamiento con 10% de grasa, este último teniendo una mayor temperatura de pasta. De acuerdo con Figueroa y col. (2013), al someter a un proceso de recocado al almidón se encuentra un aumento de su temperatura de pasta y por lo tanto aumenta su estabilidad ante un colapso, es decir, se necesita mayor temperatura para gelatinizarlo, debido a una alteración en su estructura; por lo que se infiere que la muestra que presentó una mayor estabilidad fue de la variedad Cacahuacintle con 10% de grasa.

Cuadro 10. Parámetros reológicos en maíces pozoleros

V	T	Temperatura pasta (°C)	Viscosidad inicial (cP)	Viscosidad máxima (cP)	Viscosidad final (cP)	Retrogradación (cP)
CH	0	79.80 ± 0.46 ^{A,b}	22.02 ± 1.22 ^{A,a}	866.5 ± 54.53 ^{B,b}	1683.5 ± 46.3 ^{A,a}	817 ± 36.0 ^{A,a}
	6	80.89 ± 0.54 ^{A,ab}	20.53 ± 2.29 ^{A,a}	1135 ± 123 ^{A,a}	1882 ± 253 ^{A,a}	747 ± 135.77 ^{A,ab}
	8	81.74 ± 1.49 ^{A,ab}	22.41 ± 0.94 ^{A,a}	478.7 ± 61.5 ^{C,c}	1072.3 ± 26.1 ^{B,b}	594 ± 38.71 ^{B,b}
	10	82.39 ± 1.81 ^{A,a}	21.25 ± 3.03 ^{A,a}	333.6 ± 54.5 ^{D,c}	744.3 ± 75.9 ^{C,c}	411 ± 59.90 ^{C,c}
Poz 1	0	79.86 ± 1.11 ^{A,a}	21.94 ± 1.10 ^{Aa,b}	175.80 ± 5.28 ^{EFG,a}	388.17 ± 5.46 ^{DE,a}	212 ± 8.19 ^{DE,a}
	6	80.91 ± 0.62 ^{A,a}	25.45 ± 0.31 ^{A,a}	130.3 ± 38.7 ^{FG,ab}	274.3 ± 74.0 ^{E,b}	144 ± 35.38 ^{E,b}
	8	81.16 ± 0.67 ^{A,a}	21.84 ± 2.33 ^{Aa,b}	99.72 ± 8.14 ^{G,b}	233.3 ± 34.4 ^{E,b}	134 ± 26.69 ^{E,b}
	10	81.44 ± 0.98 ^{A,a}	21.44 ± 2.37 ^{A,b}	113.90 ± 17.53 ^{FG,b}	239.0 ± 28.0 ^{E,b}	125 ± 18.53 ^{E,b}
Poz 2	0	80.565 ± 1.18 ^{A,a}	22.78 ± 0.95 ^{A,a}	263.3 ± 20.9 ^{DE,a}	599.0 ± 84.4 ^{CD,a}	336 ± 69.71 ^{CD,a}
	6	81.21 ± 0.92 ^{A,a}	20.37 ± 3.71 ^{A,a}	222.5 ± 29.6 ^{DEF,a}	455.8 ± 70.6 ^{DE,ab}	233 ± 61.20 ^{DE,ab}
	8	82.10 ± 1.00 ^{A,a}	20.84 ± 3.27 ^{A,a}	159.2 ± 23.6 ^{EFG,b}	360.6 ± 67.8 ^{E,b}	201 ± 44.66 ^{DE,b}
	10	81.94 ± 1.588 ^{A,a}	24.07 ± 2.21 ^{A,a}	144.3 ± 35.5 ^{EFG,b}	316.5 ± 76.8 ^{E,b}	172 ± 41.95 ^{E,b}

Medias ± DE seguidas de la misma letra no muestran diferencias significativas. Letras mayúsculas indican diferencias entre los tratamientos, letras minúsculas indican diferencias entre muestras de la misma variedad. V: variedad; T: tratamiento; CH: Cacahuacintle; Poz 1: Pozolero 1; Poz 2: Pozolero 2. Nixt: nixtamalizado.

Por otro lado, de las muestras que no contienen grasa adicional, la variedad que presentó una menor temperatura de pasta fue el maíz Cacahuacintle blanco, seguido del maíz Pozolero 1 y del maíz Pozolero 2, lo anterior se podría atribuir al contenido de amilosa del almidón o a la dureza del grano, ya que se ha reportado en literatura (Figueroa y col., 2013; Nárvaez y col., 2016) que maíces con

endospermo duro requieren mayor tiempo y temperatura para gelatinizar debido al alto grado de compactación y los pocos espacios intra-granulares que no permiten la difusión del agua dentro del gránulo en comparación con las variedades de endospermo suave. En sorgo, Sang y col. (2008) encontraron una menor temperatura de pasta en muestras con menor contenido de amilosa, debido a que la amilosa inhibe el hinchamiento de los gránulos por la formación de complejos con lípidos, lo que puede resultar en altas temperaturas de pasta, que se ve reflejado también en las muestras con grasa animal añadida.

Los valores de viscosidad inicial estuvieron entre 20.37 ± 3.71 cP (Pozolero 2 adicionado 6% de grasa) y 25.45 ± 0.31 cP (Pozolero 1 adicionado 6% de grasa), no se presentaron diferencias significativas entre las muestras. La variedad de Pozolero 1 adicionado 6% de grasa (25.45 ± 0.31 cP) fue significativamente diferente a la muestra con 10% de grasa (21.44 ± 2.37 cP). En la variedad blanca no hay una tendencia en la viscosidad inicial de acuerdo con la adición de grasa. En el caso de la variedad de Pozolero 1 se observó un máximo de viscosidad inicial con un 6% de grasa y un posterior decremento de viscosidad al aumentar el contenido de grasa. Por otro lado, en el Pozolero 2 se presentó una tendencia en la viscosidad al aumentar el contenido de grasa del tratamiento, sin embargo, no existen diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos.

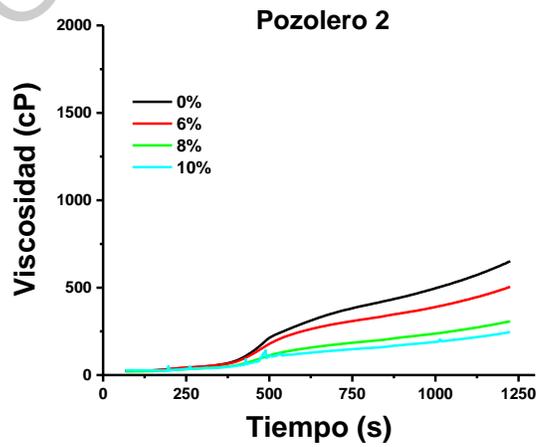
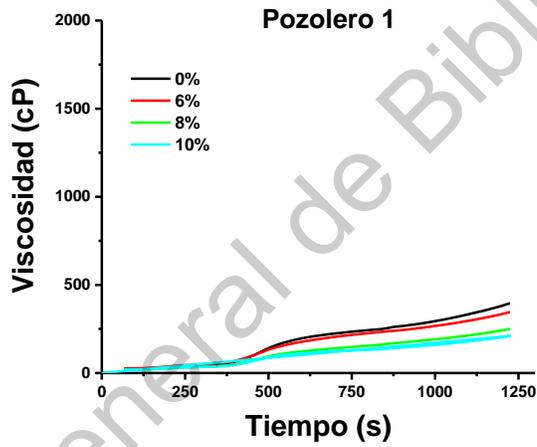
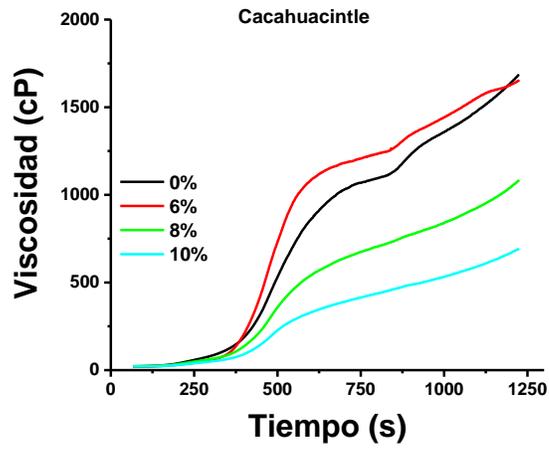


Figura 5. Perfil viscoamilográfico de maíces pozoleros con adición de grasa

La viscosidad máxima indica la capacidad del grano de absorber agua, ya que al ser expuesto a un calentamiento con suficiente agua se produce su gelatinización, la cual tiene como consecuencia un aumento de la viscosidad por el hinchamiento de los gránulos de almidón y la lixiviación de las cadenas de amilosa (Díaz, 2010). El tratamiento aplicado, así como la variedad de maíz tuvieron efecto significativo sobre la viscosidad máxima ($p < 0.05$). El maíz Cacahuacintle fue el que mostró una mayor viscosidad máxima con valores de 1135 ± 123 cP (6% grasa) hasta 333.6 ± 54.5 cP (10% grasa), seguido del maíz Pozolero 2 que presentó valores de 263.3 ± 20.9 cP (0% grasa) hasta 144.3 ± 35.5 cP (10% grasa) y por último el maíz Pozolero 1, con viscosidades de 175.8 ± 5.28 cP (0% grasa) hasta 99.72 ± 8.14 (8% grasa). Las muestras sin grasa animal añadida mostraron una viscosidad máxima mayor a las muestras con grasa, excepto en maíz Cacahuacintle con 6% de grasa. La diferencia puede atribuirse a que la grasa impide que el agua entre a los gránulos de almidón con una mayor facilidad, esto explicaría la disminución de la viscosidad máxima de las muestras al aumentar el contenido de grasa del tratamiento.

El maíz Cacahuacintle blanco con 6% de grasa (1135 ± 123 cP) fue significativamente diferente a todos los tratamientos de la misma variedad. Las muestras con 8% y 10% no presentaron diferencias en cuanto a viscosidad máxima entre sí.

En el caso del maíz Pozolero 1, la muestra sin grasa añadida fue la que tuvo una mayor viscosidad y presentó diferencias significativas con el resto de las muestras de la misma variedad. Finalmente, la muestra sin grasa del maíz Pozolero 2 no mostró diferencias con la muestra de 6%, pero aquellas tratadas con 8 y 10% sí mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$). Para la variedad de Cacahuacintle se observó una reducción de su viscosidad máxima de un 50% en una concentración de grasa de 8%, la cual también se presentó en la variedad de Pozolero 1; por otro lado, el maíz Pozolero 2 tuvo una reducción de 50% en su viscosidad máxima hasta una concentración de grasa del 10%. La disminución de la viscosidad máxima se puede atribuir a la formación de complejos amilosa-lípidos. Santiago-Ramos y col. (2015) reportaron que la presencia de complejos amilosa-lípidos reduce la

capacidad de los gránulos de almidón de absorber agua, lo cual se verá reflejado en su viscosidad máxima, por lo tanto, se puede inferir que a medida que se aumente el porcentaje de grasa adicionada se tiene mayor formación de complejos amilosa-lípidos, por ende menor absorción de agua. Los resultados de viscosidad máxima obtenidos concuerdan con lo reportado por dichos autores, ya que a medida que aumentó el contenido de grasa añadida se observó un aumento en el contenido de almidón resistente (Cuadro 6, apartado 5.4), que puede sustentar la disminución de viscosidad máxima.

En el caso de la muestra con 6% de grasa, la cual presentó mayor viscosidad máxima, se asume que fue la muestra que presentó menor formación de complejos amilosa-lípidos, esto se logró comprobar con el contenido de almidón resistente, ya que fue la muestra con el menor porcentaje de AR ($2.21 \pm 0.17\%$) de las muestras sometidas a cocción.

Las propiedades térmicas no solo se ven afectadas por una gelatinización y recocido del gránulo, sino que también se ven influenciadas por la dureza del grano (Figueroa et al., 2013), ya que este parámetro determina la capacidad de absorber y retener agua durante las diferentes etapas del proceso de recocido. De acuerdo con diversos autores (Watson, 2003; Salinas y Aguilar, 2011), la dureza del grano de maíz es directamente proporcional con la absorción de agua, es decir cuanto más suave es el maíz los gránulos de almidón son más fácil de hidratarse. Lo que corresponde con los resultados encontrados en el presente trabajo.

Un comportamiento similar se presentó en la viscosidad final de los tratamientos, ya que a medida que aumenta el porcentaje de grasa animal añadida se presenta una disminución de la viscosidad final del maíz. El maíz Cacahuacintle presentó las mayores viscosidades finales, desde 1882 ± 253 cP (6% grasa) hasta $744 \text{ cP} \pm 75.9$ (10% grasa). El maíz Pozolero 2 presentó viscosidades entre 599 ± 84.4 cP (0% grasa) hasta 316.5 ± 78.8 cP (10% grasa). El maíz Pozolero 1 fue la variedad con menor viscosidad final (388.17 ± 5.46 cP- 239 ± 28 cP), la cual no presentó diferencias entre los tratamientos. La retrogradación del almidón es de gran interés

para la industria de alimentos, debido a que afecta la calidad, aceptabilidad y vida de anaquel de los alimentos que contienen almidón (Karim, 2000). La tendencia que presentan los gránulos de almidón a retrogradarse se puede observar por la diferencia de la viscosidad final a la que llega el gránulo y la viscosidad máxima del mismo, de acuerdo con Wang y col. (2015) esta magnitud refleja la tendencia de las cadenas de amilosa a retrogradarse. En el Cuadro 10 se presentan los valores de retrogradación, se puede observar que independientemente de la variedad se encuentra una disminución de la retrogradación, al aumentar el contenido de grasa. En la variedad Cacahuacintle la muestra sin grasa añadida presenta una magnitud de retrogradación de 817 ± 36 cP, la cual no es estadísticamente diferente a la muestra con 6% de grasa (747 ± 135.77 cP), sin embargo, se muestra una diferencia significativa entre las muestras con 8 y 10% de grasa, siendo la última la que tuvo el menor valor de retrogradación de la variedad (411 ± 59.9 cP). Con respecto a la variedad de Pozolero 1, la muestra con 0% de grasa fue estadísticamente diferente a las demás muestras de la misma variedad, teniendo el mayor valor de retrogradación (212 ± 8.19 cP). Finalmente, dentro de la variedad de Pozolero 2, las muestras con 0 y 6% mostraron ser significativamente iguales entre ellas. Se ha reportado que la presencia de compuestos como lípidos, sales, proteínas o péptidos pueden determinar que la retrogradación se vea favorecida, retardada o inhibida (Wang y col. 2015; Liu y col., 2017). De acuerdo con Wang y col. (2015), la adición de lípidos a un alimento basado en almidón retarda la retrogradación del almidón, los que concuerdan con los resultados obtenidos en el presente trabajo, ya que se observa que a medida que se aumenta el contenido de grasa animal del tratamiento se reduce la retrogradación. Lo anterior se puede explicar por varias razones, la primera, es que debido a la adición de lípidos se impide la penetración del agua dentro del gránulo de almidón, el hinchamiento del mismo y por ende, la lixiviación de las cadenas de amilosa, como resultado el movimiento de éstas es limitado y por lo tanto se tiene una menor retrogradación. Otra de las vías es que al formarse complejos amilosa-lípidos durante el calentamiento y el almacenamiento, se puede tener una inhibición en la unión de moléculas de amilosa-amilosa para formar estructuras helicoidales por lo que se disminuye la formación de puentes de

hidrógeno; y finalmente, la presencia de complejos amilosa-lípidos puede influir en la recristalización de las cadenas de amilopectina (Wang y col., 2015).

5.7 Propiedades morfológicas y estructurales del almidón nativo, almidón nixtamalizado y recocido.

5.7.1 Microestructura y morfología del gránulo de almidón

En la Figura 6 se presentan las micrografías de las tres variedades de maíz crudas y nixtamalizadas. En las tres variedades crudas (A, C y E) se observa el pericarpio (p) y la capa de aleuronas (a). Se determinó el grosor de pericarpio de cada una de las muestras crudas. El maíz Cacahuacintle fue la variedad que mostró menor grosor de pericarpio con $23.16 \pm 1.22 \mu\text{m}$; seguido del maíz Pozolero 2, el cual tuvo un grosor de $35.24 \pm 2.13 \mu\text{m}$; finalmente el maíz Pozolero 1 fue la variedad con mayor grosor de pericarpio ($45.69 \pm 2.46 \mu\text{m}$). Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Narváez-González y col. (2006), en donde evaluaron 71 variedades de maíz. Los autores reportan un grosor de pericarpio para la variedad Cacahuacintle de $29 \mu\text{m}$, mientras que para la variedad de Elotes Occidentales un grosor de pericarpio de $45 \mu\text{m}$. La variabilidad del espesor de pericarpio se debe principalmente a la genética así como al medio ambiente en donde se siembran los maíces. Estudios genéticos han demostrado que la variación del espesor del pericarpio es altamente variable, uno o dos genes gobiernan la diferencia de hasta 30 o $40 \mu\text{m}$, mientras que de dos a cuatro genes deben ser considerados en el caso de mayores espesores (Ito y Brewbaker, 1991).

Al ser sometidos a un proceso de nixtamalización, se observó que en las tres variedades el pericarpio fue hidrolizado por efecto del hidróxido de calcio, como se puede ver en la Figura 6B (Cacahuacintle), Figura 6D (Pozolero 1) y Figura 6F (Pozolero 2), quedando expuesta la capa de aleuronas. Resultados similares reportaron Figueroa y col. (2013), en donde al someter el maíz Cacahuacintle a nixtamalización las capas del pericarpio son removidas, quedando intacta la capa de aleuronas. La pérdida del pericarpio se debe principalmente a la acción del hidróxido de calcio durante la nixtamalización, ya que éste tiene como principal

objetivo remover la capa externa del grano de maíz (pericarpio) para que el grano pueda abrirse como una flor durante una cocción posterior; además de tener un efecto en el color del mismo (Figuroa y col., 2013).

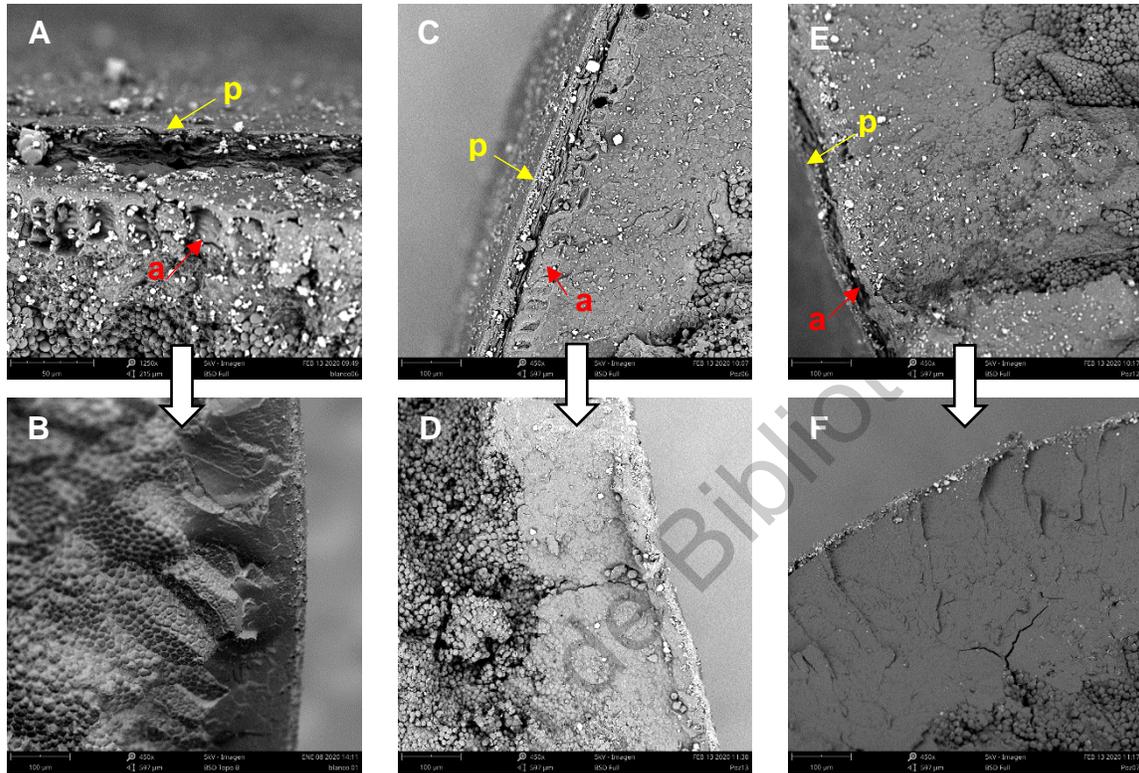


Figura 6. Micrografías de maíces crudos y nixtamalizados. A: maíz Cacahuacintle; B: maíz Pozolero 1; C: maíz Pozolero 2; p: pericarpio; a: capa de aleuronas

Las muestras de maíz sin procesamiento presentaron un rango en el diámetro de los gránulos de almidón de 10.36-14.54 μm (Figura 7). El maíz Cacahuacintle fue la variedad que presentó gránulos de almidón con menor diámetro ($10.36 \pm 1.0 \mu\text{m}$); seguido de la variedad Pozolero 2 ($11.96 \pm 1.55 \mu\text{m}$); y finalmente el maíz Pozolero 1 ($14.50 \pm 1.91 \mu\text{m}$). Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Narváez-González y col. (2006), que reportan un tamaño del gránulo de almidón entre 8-16 μm . Se ha asociado el tamaño de los gránulos de almidón con el nivel de compactación que tienen dentro del gránulo, es decir, gránulos más pequeños son característicos de endospermos más compactos (Narváez-González y col., 2006); sin embargo, los resultados obtenidos no mostraron este comportamiento, ya que la variedad con menor dureza (Cacahuacintle) fue la que mostró un menor tamaño

de gránulo de almidón, mientras que la variedad con mayor dureza (Pozolero 1) fue la que presentó mayor tamaño de gránulos de almidón. De acuerdo con Cervantes-Ramírez y col. (2020), el tamaño del gránulo de almidón es un factor importante que influye en el comportamiento del mismo.

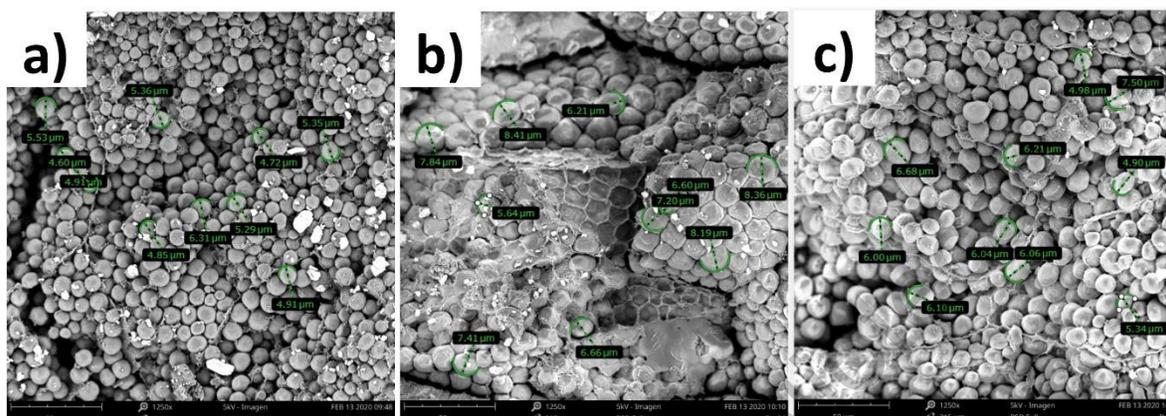


Figura 7. Micrografías de maíces crudos. a: maíz Cacahuacintle; b: maíz Pozolero 1; c: maíz Pozolero 2

Los autores mencionan que el maíz puede tener gránulos de almidón con forma esférica o poligonal; sin embargo en las variedades analizadas en el presente trabajo, se encontraron gránulos homogéneos esféricos.

El maíz Cacahuacintle crudo (Figura 7a) presentó una forma esférica y con espacios intragranulares entre los gránulos de almidón. Por otro lado en la muestra cruda de maíz Pozolero 1 (Figura 7b) tuvo una mayor compactación de los gránulos de almidón, es decir, menor espacio entre los gránulos de almidón, éstos no mostraron la misma esfericidad que la variedad Cacahuacintle. En la muestra cruda del maíz Pozolero 2 (Figura 7c) se observaron gránulos de almidón esféricos con espacios intragranulares similares a la variedad Cacahuacintle. De acuerdo con diversos autores (Narváez-González y col., 2006; Figueroa y col., 2013) los gránulos de almidón en endospermo duro pueden presentar forma poligonal con pocos espacios intragranulares, mientras que los gránulos del endospermo suave generalmente presentan una forma esférica con mayor espacios intragranulares, por lo que se relaciona la forma de los gránulos con la dureza del grano de maíz. Los resultados

obtenidos concuerdan con lo reportado en literatura, ya que las variedades con mayor suavidad (Cacahuacintle y Pozolero 2) los gránulos de almidón mostraron forma esférica y espacios intragranulares, mientras que en la variedad Pozolero 1 no se encontraron, debido a que esta última variedad fue la que mostró mayor dureza (Cuadro 2), por ende presentó gránulos de almidón más compactos. Narváez-González y col. (2006) mencionan que la fuerza de adhesión entre la proteína y el almidón es suficientemente fuerte para que los gránulos estén más próximos unos con otros, conforme aumenta la dureza en el maíz. La forma esférica de los gránulos de almidón en endospermo suave, es característica de los maíces destinados para obtener pozole, lo cual se relaciona con la textura suave, mayor porosidad, y aumento de hinchamiento en el producto final (Figuroa y col., 2013).

En la Figura 8 se observa el cambio en la microestructura del gránulo de almidón de la variedad Cacahuacintle al ser sometida a un proceso de nixtamalización (b), cocción (c) y diferentes niveles de grasa (d, e y f). Al nixtamalizar el maíz Cacahuacintle y observar la muestra en SEM, no se encontró daño en la estructura de los gránulos de almidón, sin embargo, se observó un desprendimiento de la matriz proteica, además un menor tamaño en los gránulos esféricos del almidón. Palacios-Fonseca y col. (2013) aplicaron diferentes tratamientos ácido-alcalinos en maíz, encontrando que el tratamiento alcalino los cuerpos proteicos alrededor de los gránulos de almidón se pierden, observándose como pequeñas esferas. Lo que podría relacionarse con lo observado en la muestra nixtamalizada de maíz Cacahuacintle, que las esferas de menor tamaño pudieran ser cuerpos proteicos.

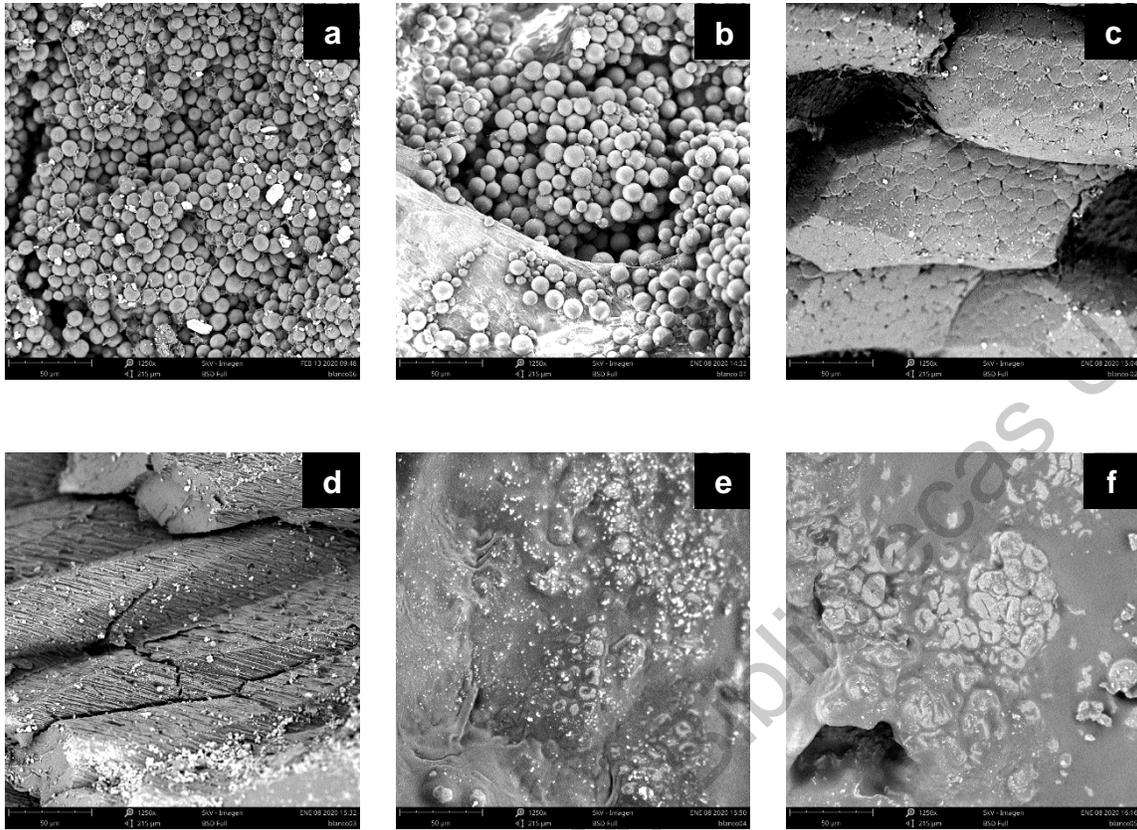


Figura 8. Micrografías (1200x) de maíz Cacahuacintle con diferentes tratamientos; a: crudo; b: nixtamalizado; c: 0% grasa; d: 6% grasa; e: 8% grasa; f: 10% grasa

El inciso c de la Figura 8, la muestra con 0% de grasa añadida, se observa un daño en los gránulos de almidón debido al tratamiento térmico aplicado, sin embargo, se logran ver los gránulos de almidón que se encuentran más compactos en comparación con la muestra cruda, esto se puede atribuir al hinchamiento de los gránulos de almidón (Cornejo-Villegas y col. 2017), por lo que el espacio intragranular de los mismos se reduce. Además, Figueroa y col. (2013) reportaron que los gránulos de almidón del pozole no estallan tan fácilmente después de haber sufrido un hinchamiento (provocado por un proceso térmico y reposo). En la muestra con 6% de grasa añadida (Figura 8d) se observa una estructura poligonal en la cual no se distinguen los gránulos de almidón, esto puede deberse a una desintegración de los mismos y como consecuencia una pérdida de su estructura esférica. De acuerdo con Cornejo-Villegas y col. (2017) la desintegración de los gránulos de almidón debido a altas temperaturas causa un aumento en la viscosidad aparente, lo que corresponde con lo obtenido en la variedad Cacahuacintle con 6% de grasa

que mostró una mayor viscosidad inicial en comparación con el resto de los tratamientos, lo que se puede relacionar con la pérdida de la estructura de almidón. La Figura 8e (muestra con 8% de grasa añadida), se observa que la grasa se encuentra en la superficie de los gránulos recubriéndolos por completo, sin embargo, aún se puede distinguir la forma esférica de los mismos; un comportamiento similar se observó en la muestra con 10% de grasa (Figura 8f). Los resultados de las micrografías pueden explicar los bajos valores de viscosidad obtenidos, ya que la capa de grasa cubre los gránulos de almidón y actúa como protector, evitando que los gránulos de almidón sufran daño pero además evitando la absorción de agua al someterse a un tratamiento térmico (Figueroa y col., 2013). Cervantes-Ramírez y col. (2020), reportaron que al tratar almidón aislado con ácido oleico y esteárico (5 y 10%) se observó la presencia de los ácidos grasos depositados alrededor de los gránulos de almidón, lo que influyó en las propiedades térmicas y de pasta de las muestras; además de que la capa de grasa depositada en la superficie de los gránulos afectó la difusión del agua dentro del gránulo, reduciendo así su capacidad de absorber agua y por lo tanto su viscosidad, lo que corresponde con los resultados encontrados (Figura 5).

En la Figura 9 se muestran micrografías correspondientes a la muestra de maíz Pozolero 1 crudo (g), nixtamalizado (h), y con grasa añadida (i, j, k y l). En la muestra nixtamalizada (Figura 9h) se observó un ligero daño en los gránulos de almidón, sin embargo no se observaron cuerpos proteicos como en la variedad Cacahuacintle (Figura 8b). La muestra con 0% de grasa añadida mostró el mismo comportamiento que la variedad Cacahuacintle (Figura 8c), ya que los gránulos de almidón son más compactos debido a la hinchazón de los mismos durante el proceso de cocción. Por otro lado, la muestra con 6% de grasa añadida (Figura 9j) mostró una apariencia compacta, con forma poligonal y el daño de los gránulos de almidón fue más evidente, con desprendieron de la matriz proteica. En la muestra con 8% de grasa añadida (Figura 9k) se conserva la forma poligonal de los gránulos de almidón. Las micrografías tomadas a la muestra con 10% de grasa (Figura 9l) no presentaron la misma nitidez a las demás muestras, debido a que la grasa se encontraba en la

superficie de los gránulos, sin embargo se logra distinguir la forma poligonal de los gránulos de almidón.

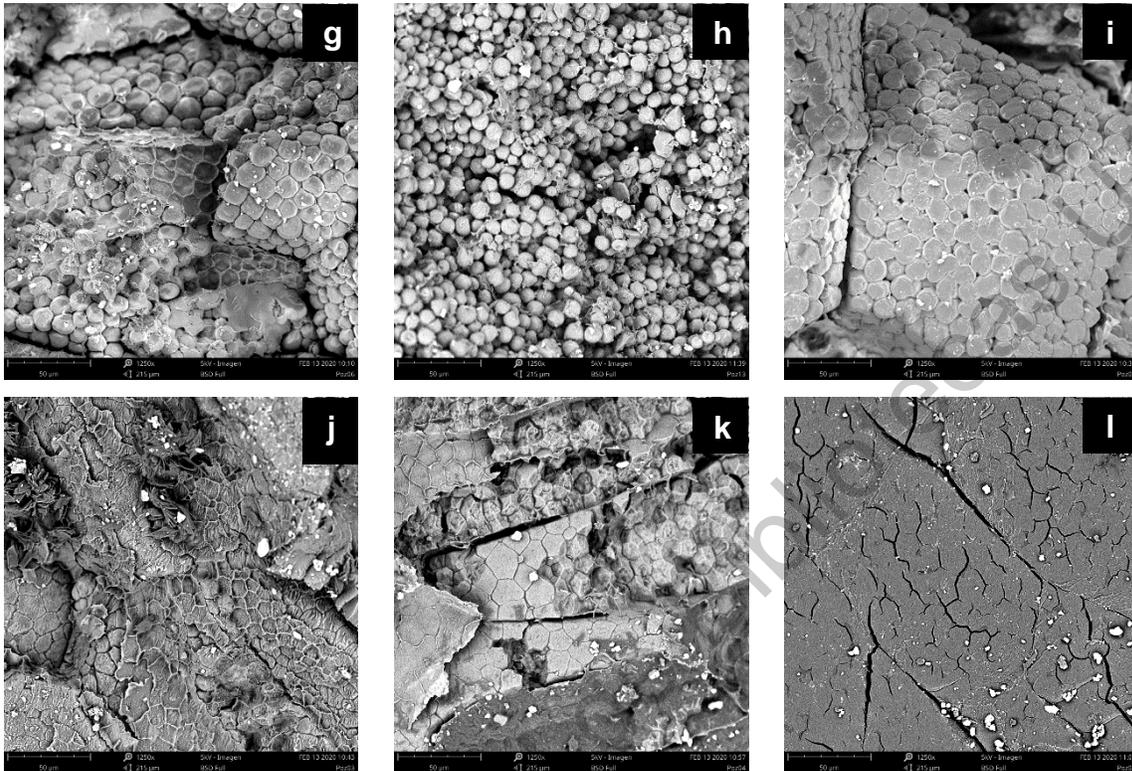


Figura 9. Micrografías (1200x) de maíz Pozolero 1 con diferentes tratamientos; g: crudo; h: nixtamalizado; i: 0% grasa; j: 6% grasa; k: 8% grasa; l: 10% grasa

Se observó que en la variedad maíz Pozolero 1, la muestra con 10% de grasa (Figura 9l) fue en la única que se apreció la capa de grasa en la superficie de los gránulos de almidón. El efecto de la grasa fue similar a lo observado en las muestras de maíz Cacahuacintle con 8 y 10%, ya que la grasa en la superficie de los gránulos de almidón afectó la difusión de agua dentro del gránulo, por lo que presentó la menor viscosidad en comparación a los demás tratamientos de la misma variedad (Figura 5). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Yu y col. (2018), en donde se indica que los ácidos grasos no acomplexados pueden actuar como barrera contra la distribución del agua dentro del gránulo.

En la Figura 10 se presentan las micrografías correspondientes a la variedad Pozolero 2 sin tratamiento (inciso m), nixtamalizada (inciso n) y con los cuatro niveles de grasa (inciso o, p, q y r). La muestra nixtamalizada (Figura 10n) presentó

gránulos de almidón casi intactos, demostrando que el proceso de nixtamalización no fue suficiente para ocasionar un daño severo; además se observó la presencia de esferas de menor tamaño que los gránulos de almidón, similar a las observadas en la variedad Cacahuacintle (Figura 8b), por lo que las esferas de menor tamaño podrían atribuirse a cuerpos proteicos (Palacios-Fonseca y col., 2013). Por otro lado, en la muestra cocida sin grasa añadida (Figura 10o) no se conservó la forma original de los gránulos de almidón (esférica), sino se observó un daño severo, indicando una desintegración de los gránulos de almidón. Cornejo-Villegas y col. (2017), mencionan que la desintegración del gránulo de almidón puede ocurrir por diferentes factores, como lo es la exudación de amilosa del gránulo de almidón, así como por un proceso mecánico, lo que ocasiona la pérdida de la forma original del gránulo. El inciso p (Figura 10) corresponde a la muestra con 6% de grasa añadida, en donde los gránulos de almidón se encuentran ordenados de una forma compacta, sin embargo, la forma de los mismos se conserva, lo que podría atribuirse a que la grasa añadida durante el proceso de cocción de los granos tiene un efecto protector (Cervantes-Ramírez y col., 2020).

La Figura 10q corresponde a la muestra de maíz Pozolero 2 con 8% de grasa añadida, sin embargo, no se pudo obtener una imagen clara de la muestra debido a la integración de la grasa en la superficie de los gránulos de almidón. Finalmente la Figura 10r (muestra con 10% de grasa añadida de Pozolero 2), se observó la presencia de gránulos semi-íntegros, así como de filamentos que unen a gránulos de almidón entre sí. De acuerdo con Cornejo-Villegas y col. (2017), los filamentos presentes pudieran ser gránulos de almidón gelatinizados o bien amilosa lixiviada.

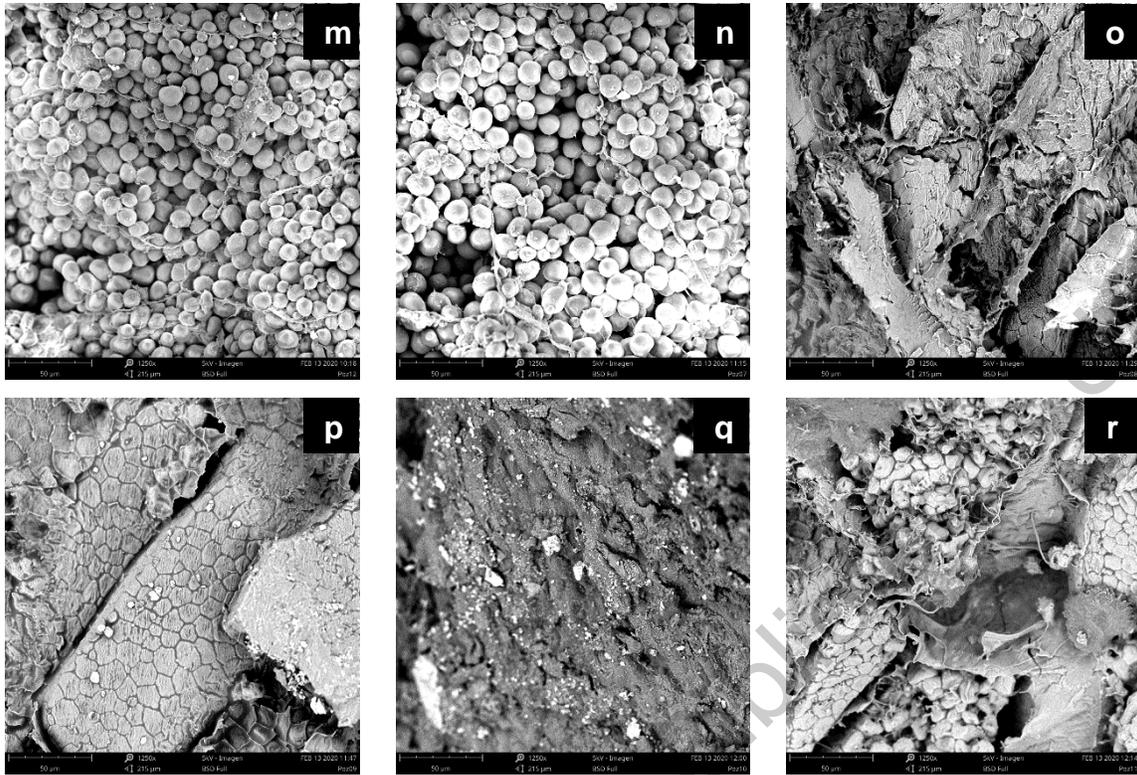


Figura 10. Micrografías (1200x) de maíz Pozolero 2 con diferentes tratamientos; m: crudo; n: nixtamalizado; o: 0% grasa; p: 6% grasa; q: 8% grasa; r: 10% grasa

5.7.2 Patrón de difracción de rayos X

En la Figura 11 se muestran los patrones de difracción rayos X de las tres variedades de maíz estudiadas en crudo y nixtamalizadas. Se observaron cuatro principales picos correspondientes a los ángulos 15° , 17° , 18° y 23° en la escala 2θ . Mediante la ecuación de Bragg (Ec. 2) se calcularon las distancias interplanares correspondientes a estos ángulos, obteniendo 5.8, 5.16, 4.8 y 3.8\AA respectivamente.

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta \quad (\text{Ec. 2})$$

Los picos observados en las muestras crudas son característicos del patrón de difracción del almidón tipo A, asociado principalmente a los cereales (Zobel, 1988). Desde un punto tradicional, se ha reportado que los cereales generan un patrón de difracción de rayos X tipo A, mientras que los tubérculos presentan un patrón de difracción de rayos X tipo B; la diferencia entre estos dos patrones radica en que el

tipo A es resultado de una estructura relativamente compacta con un bajo contenido de agua (alrededor de las hélices de amilosa) comparada con la estructura del tipo B, la cual presenta una estructura más abierta e hidratada, en donde las moléculas de agua se encuentran en el centro de la misma (Tester y col., 2004). Cervantes-Ramírez y col. (2020) reportan que el patrón A corresponde a una estructura cristalina ortorrómbica.

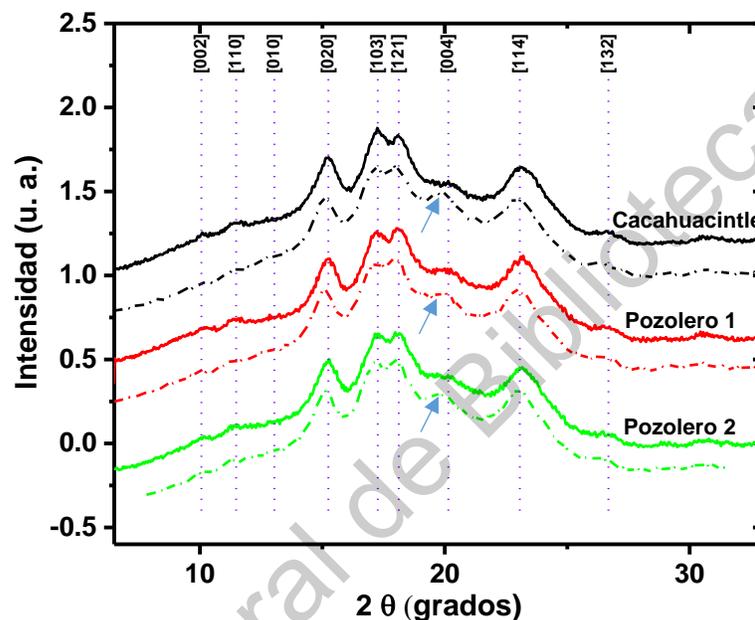


Figura 11. Patrones de rayos X de muestras crudas de maíces pozoleros. Las muestras nixtamalizadas son señaladas con líneas punteadas

Al someter los granos a un proceso de nixtamalización (Figura 11, líneas punteadas), se produjo una modificación en la estructura del almidón originando un ligero desplazamiento hacia la izquierda en los picos situados en 17° (103) y 18° (121) en la escala 2θ , indicando un aumento en la distancia interplanar por lo que se puede sugerir un aumento en el tamaño del cristal, esto indicaría que el proceso de nixtamalización afecta la estructura cristalina del almidón, favoreciendo la generación de una estructura más desordenada o amorfa que se ve reflejado en el desplazamiento de las distancias interplanares (Warren, 1941). Se observó una definición del pico situado en el ángulo 20.17° (004) en la escala 2θ el cual tiene una distancia interplanar de 4.40Å (Figura 11, flechas), este pico se reporta como característico de la amilosa (Figuroa y col., 2013). Sin embargo, diversos autores

(Chang y col., 2013; Mariscal-Moreno y col., 2015; Santiago-Ramos y col., 2017) lo atribuyen a la posible formación de complejos amilosa-lípidos; es importante mencionar que, la presencia de un solo pico no es suficiente para validar la existencia de una nueva estructura (Cervantes-Ramírez y col. 2020). La variedad Cacahuacintle mostró una mayor definición de dicho pico (004), seguido del maíz Pozolero 2 y finalmente, el maíz Pozolero 1, indicando un incremento de amilosa aparente debido a la des-ramificación de las cadenas de amilopectina por la nixtamalización (Figuroa y col., 2013).

Como se observa en la Figura 12 el proceso de cocción produjo modificaciones en la estructura cristalina del gránulo de almidón de las tres variedades estudiadas. La Figura 12a muestra el patrón de rayos X del maíz Cacahuacintle sometido a diferentes niveles de grasa añadida durante la cocción. Se observó que en las muestras correspondientes a 0, 8 y 10% de grasa añadida, los picos característicos del patrón A (15° , 18° y 23° , escala 2θ) disminuyeron su intensidad, lo que indicaría un daño en la estructura ortorrómbica (Cervantes-Ramírez y col., 2020) y a su vez se encontró un incremento de intensidad en los ángulos 13° y 20° (escala 2θ), los cuales son característicos del patrón V, el cual se ha atribuido a la presencia de complejos amilosa-lípidos (Zobel, 1988). De acuerdo con Figuroa y col. (2013), la disminución de los picos correspondientes a los ángulos: 15° y 23° (escala 2θ), propios de la amilopectina, puede atribuirse a que al someter al maíz a un tratamiento térmico, como lo es la cocción del pozole, hay una des-ramificación de las cadenas de amilopectina, lo cual puede llevar al incremento de cadenas de menor peso molecular, haciendo que se tenga un incremento de amilosa aparente, con lo que también se podría explicar el aumento del pico correspondiente al ángulo 20° (004).

La muestra con 6% de grasa añadida de la variedad Cacahuacintle (Figura 12a, línea azul) no mostró el mismo comportamiento, ya que no presentó una disminución en la intensidad del pico correspondiente al ángulo 18° (2θ) como se observó en los demás tratamientos, sin embargo, se observó un aumento de intensidad en el ángulo 20° (2θ), por lo que se sugiere que existe una mezcla entre

el patrón A y el patrón V, resultados similares reportan Mariscal-Moreno y col. (2015) en tortillas. Por otro lado, Figueroa y col. (2016), reportan una mezcla de patrones A+V en masa para tamales, la cual ya sufrió un proceso de nixtamalización, dichos autores indican que para esta etapa en donde no se tiene una cocción, los complejos amilosa-lípidos que se desarrollan no tienen una forma ordenada, es decir, son complejos tipo I, mientras que en tamales (ya con un proceso de cocción) se encontró un patrón V, el cual indicaría la formación de complejos tipo II, esto es consecuencia de un tratamiento térmico más largo que favorece la formación de complejos tipo II. Por lo tanto, se puede asumir que la muestra con 6% de grasa añadida no presentó la misma formación de complejos amilosa-lípidos que se observó en los demás tratamientos (Figura 12a, línea azul). Lo anterior coincide con el porcentaje de almidón resistente encontrado en dicha muestra ($2.21 \pm 0.17\%$, apartado 5.4), el cual fue el menor de todas las muestras sometidas a cocción de la variedad Cacahuacintle. Otro factor, es la alta viscosidad encontrada en esta muestra (1135 ± 123 cP, apartado 5.6), ya que de acuerdo a Santiago-Ramos y col. (2015) la presencia de complejos amilosa-lípidos reduce la capacidad de los gránulos de almidón de absorber agua, y por lo tanto disminuye la viscosidad de los mismos.

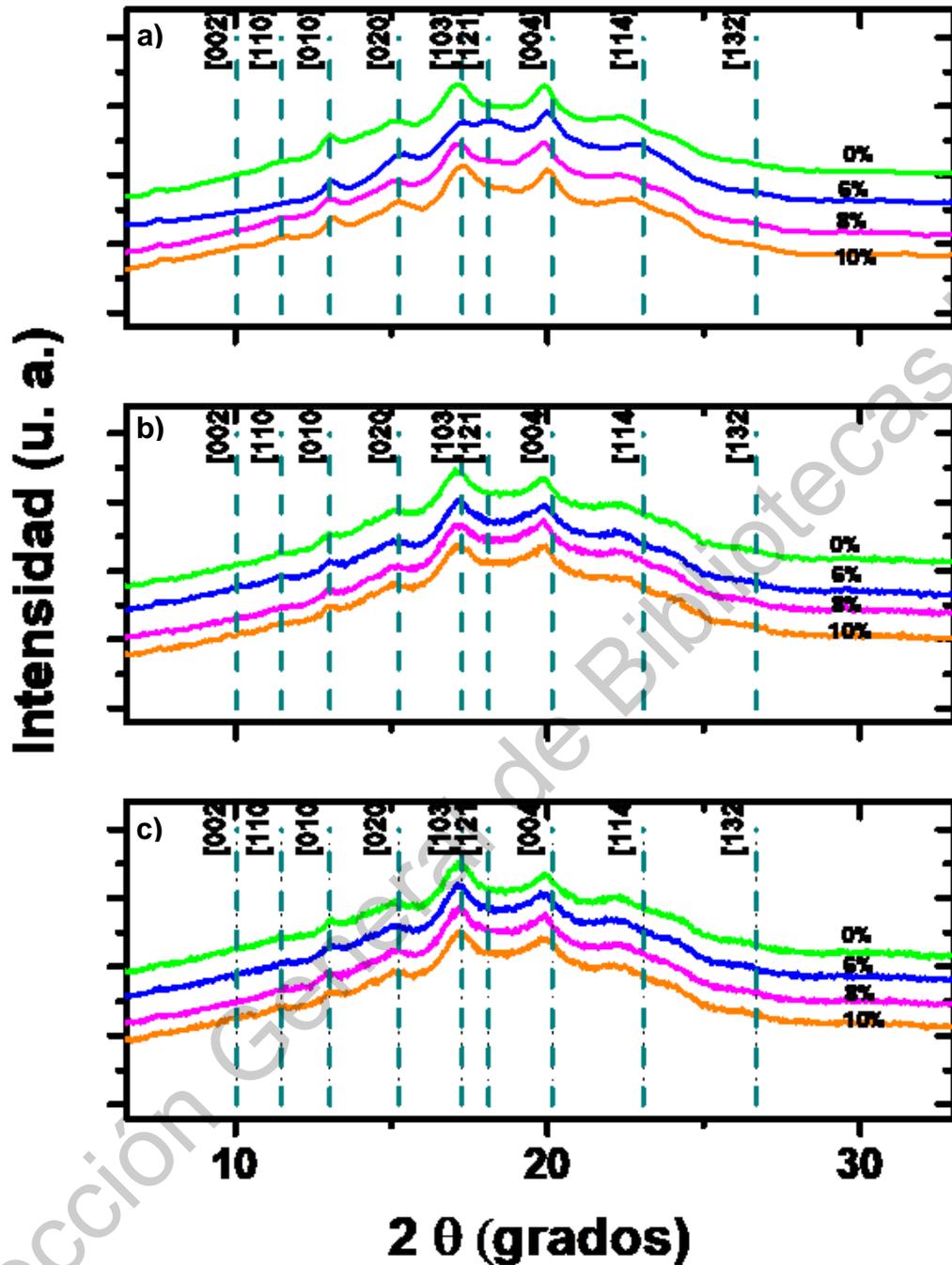


Figura 12. Patrón de rayos X de muestras sometidas a cocción con grasa añadida; a) maíz Cacahuacintle, b) maíz Pozolero 1, c) maíz Pozolero 2

La Figura 12b corresponde al maíz Pozolero 1, mientras que la Figura 12c es el maíz Pozolero 2 sometidas a cocción el mismo nivel de grasa. Al igual que en la

variedad Cacahuacintle, la inclusión de grasa así como la energía usada en la cocción para la elaboración de pozole produjo una modificación en la estructura ortorrómbica del patrón A, ya que se presenta una disminución de los picos correspondientes a los ángulos 18° y 23° en 2Θ , lo cual es indicativo de una pérdida de cristalinidad (Cervantes-Ramírez y col., 2020); mientras que la intensidad de la señal del ángulo 20° en 2Θ aumentó, como ya se mencionó, este incremento se asocia a la posible formación de complejos amilosa-lípidos.

En las muestras sometidas a cocción con grasa añadida de las tres variedades de maíz se observó una disminución de los picos ubicados en los planos 020 y 114, correspondientes a los ángulos 15° y 17° en 2Θ , que corresponden a la amilopectina (Figueroa y col. 2013). Como ya se mencionó anteriormente se puede asumir que el proceso de cocción produjo des-ramificación en las cadenas de amilopectina, lo que se ve reflejado en una pérdida de cristalinidad del almidón. Por otro lado, se observó un desplazamiento hacia la izquierda del pico ubicado en el ángulo 17° en 2Θ con dirección interplanar (103), lo que muestra un aumento de las distancias interplanares, lo que indicaría que la estructura cristalina sufre un estiramiento y por lo tanto el tamaño del cristal aumenta.

De acuerdo a sus características estructurales las cadenas de amilosa pueden interactuar con otras moléculas, formando complejos (Chang y col., 2015). Se ha reportado que moléculas pequeñas como ácidos grasos tienden a formar dos estructuras: estructura V_6 -hidratada (V_{6h}) o estructura V_6 -anhidra (V_6) (Tan y Kong, 2019). Los picos correspondientes a los ángulos 7.5° , 13.05° y 20.02° en 2Θ (con distancia interplanar de 11.78, 6.78, 4.43\AA respectivamente) mostraron un aumento de intensidad en las muestras adicionadas con grasa, los resultados obtenidos concuerdan con las distancias interplanares correspondientes a la estructura V_{6h} reportada por Zobel (1988). Se observó que la variedad Cacahuacintle fue la que mostró un mayor aumento de dichos picos, seguido de la variedad Pozolero 2 y finalmente, la variedad Pozolero 1.

El pico observado en el ángulo 20.02° (2Θ) en las muestras con grasa añadida de las tres variedades de maíz mostró un ligero desplazamiento hacia la izquierda, por

lo que las distancias interplanares aumentaron, este cambio de estructura se puede atribuir a la interacción que tiene la amilosa con otra molécula, en este caso se esperaría que fuera con los lípidos añadidos, ya que la amilosa sufre una modificación estructural al ser más abierta.

De acuerdo con Cervantes-Ramírez y col. (2020), un solo plano no es suficiente para identificar una nueva estructura cristalina, ya que es necesario tener al menos tres diferentes planos con tres diferentes orientaciones cristalinas para una correcta identificación de la fase cristalina. En este caso, el aumento de intensidad evidente se encontró en los picos correspondientes a los ángulos 13° y 20° (2θ), mientras que el aumento del pico correspondiente al ángulo 7.5° (2θ) fue muy tenue. Sin embargo, los resultados obtenidos en los patrones de difracción de rayos X que sugieren la presencia de complejos amilosa-lípidos se pueden confirmar con el aumento en el contenido de almidón resistente de las muestras al ser sometidas a cocción con adición de grasa (apartado 5.4), así como en los endotermas encontradas a temperaturas correspondientes a la fusión de complejos tipo I y tipo II en termogramas (apartado 5.5) y en la disminución de viscosidad máxima de las muestras atribuido a la presencia de complejos amilosa-lípidos (apartado 5.6).

5.7.3 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

En la Figura 13 se encuentra el espectro FTIR de las tres variedades de maíz estudiadas en crudo y nixtamalizadas. Todos los espectros mostraron las bandas características reportadas para el almidón de maíz. La banda a 3290 cm^{-1} [w] fue identificada como una vibración de estiramiento simétrico de los grupos O-H y C-H, mientras que la banda a 2926 cm^{-1} [t] corresponde a un estiramiento asimétrico del grupo funcional $-\text{CH}_2$ de los lípidos presentes naturalmente en el maíz (Preciado-Ortiz y col., 2018). La banda a 1642 cm^{-1} [q] fue identificada como un estiramiento del grupo funcional C=O correspondiente a una amida primaria en proteínas (Barraza-Garza y col., 2013). Por otro lado la banda a 1336 cm^{-1} [m] puede ser originada por la flexión de $-\text{CH}_2$ (Deeyai y col., 2012). La banda a 1150 cm^{-1} [f] corresponde a un movimiento de tensión y flexión del enlace C-O. La banda observada a 1076 cm^{-1} [d] fue identificada como una tensión del grupo funcional

C=O de los lípidos presentes en el grano de maíz (Barraza-Garza y col., 2013). Finalmente, las bandas a 998 cm^{-1} [c] y 928 cm^{-1} [a] corresponden respectivamente a la flexión del enlace C-O-H y al modelo esquelético del enlace α -glucosídico C-O-C (Deeyai y col., 2012).

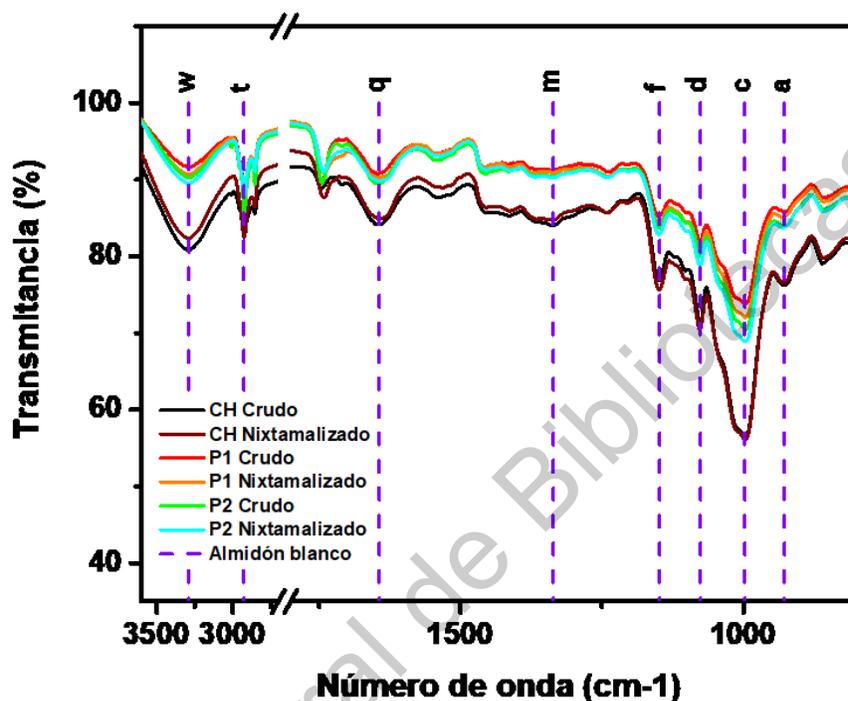


Figura 13. Espectro FTIR de muestras crudas y nixtamalizadas

En la Figura 14 se encuentran los espectros de las muestras sometidas a cocción y adición de grasa de las tres variedades de maíz estudiadas. En todas las muestras se observaron las bandas características del almidón; las líneas verticales de la Figura 14 muestran las bandas características de la grasa cocida (manteca de cerdo). La primera banda observada corresponde a 3008 cm^{-1} [v], la cual solo se observó en la muestra tratada con 8% de grasa de la variedad Pozolero 2, esta banda corresponde al enlace C=CH y C-H presente en los lípidos, resultados similares reportan Cervantes-Ramírez y col., 2020, en donde esta banda es atribuida al ácido oleico (C18:1). De acuerdo con Ripoche y Guillard, 2001, la manteca de cerdo está compuesta principalmente por ácidos grasos monosaturados (ácido oleico C18:1), seguido de ácidos grasos saturados (ácido

palmitico C16:0 y ácido esteárico C18:0) y en menor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados (ácido linoleico C18:2).

La banda a 2926 cm^{-1} [t] correspondiente al estiramiento asimétrico de $-\text{CH}_2$ atribuido al ácido oleico (Cervantes-Ramírez y col., 2020), esta banda ya estaba presente en el almidón, sin embargo se observó un aumento en la intensidad de la misma debido a la adición de grasa a las muestras. Por otro lado, la banda a 2854 cm^{-1} [s] representa el estiramiento simétrico de C-H (Wang y col., 2019). La banda a 1742 cm^{-1} [r] corresponde a la vibración de estiramiento del C=O en el metil-éster del ácido oleico (Niu y col., 2017). Las bandas observadas a 1456 cm^{-1} [o] y a 1368 cm^{-1} [n] fueron identificadas como la flexión asimétrica del enlace $-\text{CH}_3$ y la flexión simétrica de $-\text{CH}_2$ respectivamente; de acuerdo con Niu y col. (2017), en la región $1400\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ se encuentran vibraciones de los grupos alifáticos $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$. La banda a 1240 cm^{-1} [i] corresponde a un estiramiento simétrico del grupo C-O. Finalmente la banda a 1100 cm^{-1} [e] fue identificada como un estiramiento de diferentes grupos C-O, C-C, C-O-H así como una flexión del grupo C-O-H.

Diversos autores reportan que la banda correspondiente a 1022 cm^{-1} se relaciona con las estructuras amorfas presentes en el almidón, las cuales aumentan cuando el almidón se gelatiniza y disminuye cuando el almidón es retrogradado. Mientras que la banda a 1047 cm^{-1} se ha asociado con estructuras ordenadas, que por el contrario a lo anterior, desciende durante la gelatinización de almidón y aumenta durante la retrogradación del mismo (Cervantes-Ramírez y col., 2020; López-Silva y col., 2019; Preciado-Ortiz y col., 2018).

La banda a 1715 cm^{-1} se ha atribuido al complejo amilosa-lípidos (Marinopulou y col., 2016), en los espectros obtenidos (Figura 14, flechas) se observó un ligero pico en dicha banda en las variedades moradas (Pozolero 1 y 2) en las muestras con mayor contenido de grasa (10%).

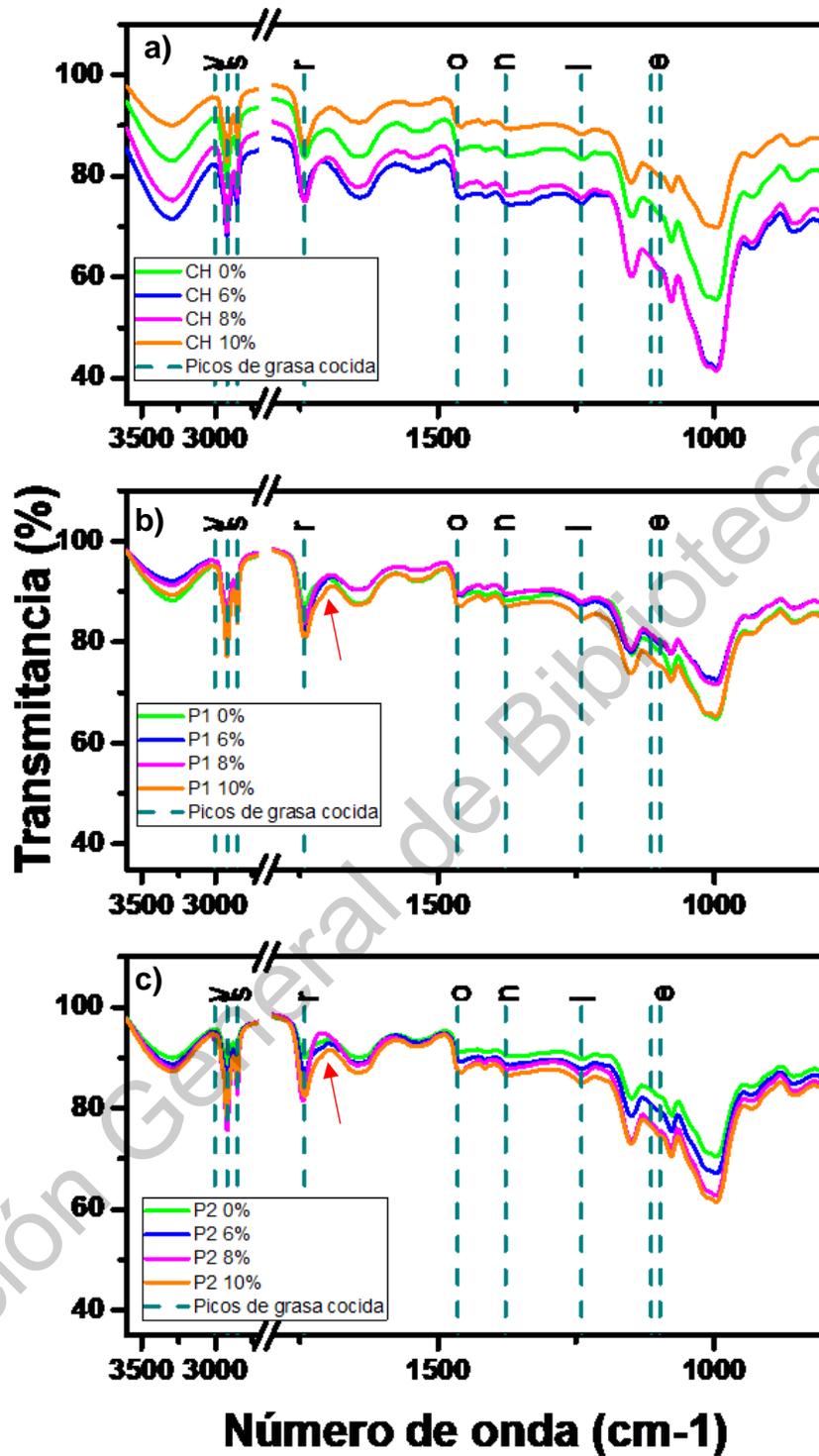


Figura 14. Espectros FTIR de muestras sometidas a cocción con grasa añadida; a) maíz Cacahuacintle, b) maíz Pozolero 1, c) maíz Pozolero 2

6. CONCLUSIONES

El maíz Pozolero 1 fue la variedad con mayor dureza, seguido del maíz Pozolero 2 y el maíz Cacahuacintle. La dureza determinó la habilidad del maíz de absorber agua durante la gelatinización del almidón, ya que se observó en los viscoamilogramas obtenidos que a medida que la dureza aumentaba, la viscosidad de las muestras disminuía.

La variedad de maíz y el contenido de grasa agregada tuvieron un efecto significativo en el contenido de almidón resistente de las muestras.

El contenido de AR en las muestras nixtamalizadas fue el doble para la variedad Cacahuacintle y Pozolero 2, el aumento se atribuyó a la interacción de las cadenas de amilosa con los lípidos presentes naturalmente en el grano de maíz.

Las muestras sometidas a cocción y adición de grasa presentaron un aumento en el contenido de AR al incrementar el contenido de grasa añadida. La variedad Cacahuacintle tuvo un máximo de AR (3.46 ± 0.45) con 10% de grasa, mientras que las variedades Pozolero 1 y 2 presentaron un máximo de AR ($3.52 \pm 0.13\%$ y $3.59 \pm 0.08\%$ respectivamente) con 8% de grasa añadida.

Las muestras con grasa añadida mostraron la endoterma de complejos amilosa-lípidos tipo I (83°C - 96°C). La variedad Cacahuacintle (6% grasa) y Pozolero 2 (10% grasa) mostraron las dos endotermas de los complejos tipo IIa (106°C - 132°C) y tipo IIb (131°C - 146°C).

La variedad de maíz y el contenido de grasa añadida mostraron tener un efecto sobre la viscosidad de las muestras ya que se observó un decremento en este parámetro al aumentar el contenido de grasa asociándose a la formación de complejos amilosa-lípidos, que se comprobó con el aumento de almidón resistente en las muestras.

De acuerdo a los patrones de Rayos X, el tratamiento de cocción así como la adición de grasa modificaron la estructura ortorrómbica inicial del almidón (tipo A), sugiriendo la formación de complejos amilosa-lípidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el porcentaje de grasa óptimo para la mayor formación de complejos es 10% para la variedad Cacahuacintle y 8% para las variedades Pozolero 1 y 2.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

7. REFERENCIAS

AACC. 2002. International Approved Methods. 11th Ed. Official Method 44-15.02. Moisture- Air Oven Methods.

AACC. 2002. International Approved Methods. 11th Ed. Official Method 46-16.01. Crude Protein- Improved Kjendahl Method, copper-titanium. Dioxide Catalyst Modification.

AACC. 2002. International Approved Methods. 11th Ed. Official Method 76-13.01. Total Starch Assay Procedure (Megazyme Amyloglucosidase/alpha-Amylase Method)

AACC. 2002. International Approved Methods. 11th Ed. Official Method 32-40.01. Resistant Starch in Starch Samples and Plant Materials.

AACC. 2003. American Association of Cereal Chemist. Memorias del Curso Internacional "Almidón y fibra dietética: Química, tecnología y biodisponibilidad".

Agama E., Juárez-García E., Evangelista-Lozano S., Rosales-Reynoso O., Bello-Pérez L.A. **2013**. Characteristics of maize starch and relationship with its biosynthesis enzymes. *Agrociencia*. 47: 1-12.

Barraza-Garza G., De la Rosa L.A., Martínez-Martínez A., Castillo.Michel H., Cotte M., Alvarez-Parrilla E. **2013**. La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicas. *Revista Latinoamericana de Química*. 41: 125-148.

Blanco Y., Durañona H., Roca R. **2016**. The effect of temperatura and humidity on maize grains conservation in metal silos. *Cultivos tropicales*. 27:105-114.

Bello-Pérez L.A., Rendón-Villalobos J.R., Agama-Acevedo E., Islas-Hernández J.J. **2006**. In Vitro starch digestibility of tortillas elaborated by different masa preparation procedures. *Cereal Chemistry*. 83: 188-193.

Bonifacio-Vázquez E.I., Salinas-Moreno Y., Ramos-Rodríguez A., Carrillo-Ocampo A. **2005**. Quality for pozole preparation in accesions of the Cacahuacintle maize. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 28: 253-260.

Buléon A., Colonna P., Planchot V., Ball S. **1998**. Mini review. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 23: 85-112.

Cervantes-Ramírez J.E., Cabrera-Ramírez A.H., Morales-Sánchez E., Rodríguez-García M.E., Reyes-Vega M.L., Ramírez-Jiménez A.K., Contreras-Jiménez B., Gaytán-Martínez M. **2020**. Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. *Carbohydrate Polymers*. 246: 1-10.

Copeland L., Blazek J., Salman H., Chiming T. **2009**. Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*. 23:1527-1534.

Cornejo-Villegas M.A., Rincón-Londoño N., Del Real A., Rodríguez-García M.E. **2017**. The effect of Ca²⁺ ions on the pastinif, morphological, structural, vibrational, and mechanical properties of corn starch-water system. *Journal of Cereal Science*. 79: 174-182.

Deeyai P., Suphantharika M., Wongsagonsup R., Dangtip S. **2012**. Characterization of Modified tapioca starch in atmospheric Argon plasma under diverse humidity by FTIR Spectroscopy. *Chinese Phys*. 30: 1- 4.

Díaz L. **2010**. 2. Carbohidratos. Principios básicos de bioquímica de los alimentos. Editorial Universidad de la Serena. 1ª Edición.

Dupuis J., Liu Q., Yada R. **2014**. Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 13: 1219-1234.

Escarpa A., González M.C., Morales M.D., Saura-Calixto F. **1997**. An approach to the influence of nutrients and other food constituents on resistant starch formation. *Food Chemistry*. 60:527-32.

FAO. **1993**. El maíz en la nutrición humana. Roma.

Fernández-Muñoz J.L., Rojas-Molina I., González-Dávalos M.L., Leal M., Valtierra M.E., San Martín-Martínez M.E., Rodríguez M.E. **2004**. Study of calcium ion diffusion in components of maize kernels during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*. 8: 65-69.

Figueroa J.D., Véles-Medina J.J., Hernández-Landaverde M.A., Aragón-Cuevas F., Gaytán-Martínez M., Chávez-Martínez E., Palacios N., Willcox M. **2013**. Effect of annealing from traditional nixtamalisation process on the microstructural, thermal, and rheological properties of starch and quality of pozole. *Journal of Cereal Science*. 58: 457-464.

Figuroa J.D., Véles-Medina J.J., Tolentino-López E.M., Gaytán-Martínez M., Aragón-Cuevas F., Palacios N., Willcox M. **2013**. Effect of traditional nixtamalisation process on starch annealing and the relation to pozole quality. *Journal of Food Process Engineering*. 36: 704-714.

Fuentes-Zaragoza E., Riquelme-Navarrete M.J., Sánchez-Zapata E., Pérez-Álvarez J.A. **2010**. Resistant starch as functional ingredient: A review. *Food Research International*. 43:931-942.

Gaytán-Martínez M., Figuroa-Cárdenas J.D., Reyes-Vega M. L., Rincón-Sánchez F., Morales-Sánchez E. **2006**. Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29: 135-139.

Ito G.M., **Brewbaker** J.L. **1991**. Genetic analysis of pericarps thickness in progenies of eight corn hybrids. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 116:1072-1077.

Jacobs H., Eerlingen R.C., Spaepen H., Grobet P.J., Delcour J.A. **1997**. Impact of annealing on the susceptibility of wheat, potato and pea starches to hydrolysis with pancreatin. *Carbohydrate Research*. 305:193-207.

Jayakody, L., and **Hoover**, R. **2008**. Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins – A review. *Carbohydrate Polymers*. 74:691–703.

Jenkins D.J., Wolever T.M., Taylor R.H. Barker H. **1981**. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 34:362-366.

Jiang F., Du C., Jiang W., Wang L., Du S-k. **2019**. The preparation, formation, fermentability, and applications of resistant starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. 150:1155-1161.

Karim A. **2000**. Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*. 71:9-36.

Kou T., Xia H., Gao Q. **2018**. New insight into the determination of amylose content for maize starches through digital image analysis. *Food Hydrocolloids*. 83: 438-444.

Lai S.L., Kokini J.L. **1991**. Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusión (A review). *Biotechnology Progress*. 7: 251-266.

López-Morales F., Vázquez-Carrillo M.G., Molina Galán J.D., García Zavala J.J., Corona-Torres T., Cruz-Izquierdo S., López-Romero G., Reyes-López D., Esquivel-Esquivel G. **2017**. Genotype-environment interaction, stability of yield and grain quality in tuxpeño maize. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8: 1035-1050.

López-Silva M., Bello-Pérez L.A., Agama-Acevedo E., Álvarez-Ramírez J. **2019**. Effect of amylose content in morphological, functional and emulsification properties of OSA modified corn starch. *Food Hydrocolloids*. 97: 105212.

Lui R., Xu C., Cong X., Wu T., Song Y., Zhang M. **2017**. Effects of oligomeric procyanidins of the retrogradation properties of maize starch with different amylose/amylopectin ratios. *Food Chemistry*. 221:2010-2017.

Marinopoulou A., Papastergiadis E., Raphaelides S. N., Kontominas M.G. **2016**. Morphological characteristics, oxidative stability and enzymic hydrolysis of amylose-fatty acid complexes. *Carbohydrate Polymers*. 141: 106-115.

Mariscal-Moreno R.M., Figueroa J.D., Santiago-Ramos D., Arámbula-Villa G., Jiménez-Sandoval S., Rayas-Duarte P., Velés-Medina J.J., Martínez-Flores H.E. **2015**. The effect of different nixtamalisation processes on some phytochemical properties, nutritional composition and glycemic index. *Journal of Cereal Science*. 65: 140-146.

Mariscal-Moreno R.M., Figueroa-Cárdenas J.D., Santiago-Ramos D., Rayas-Duarte P., Velés-Medina J.J., Martínez-Flores H.E. **2017**. Nixtamalization process affects resistant starch formation and glycemic index of Tamales. *Journal of Food Science*. 82:110-115.

Massieu Y., Lechuga J. **2002**. El maíz en México: biodiversidad y cambios en el consumo. *Análisis Económico*. 17: 281-303.

McDonough C.M., Telez-Girón A., Gómez M.H., Rooney L.W. **2001**. Alkaline cooked corn products. Chapter 4 in: *Snack Foods Processing*. E.W. Lusas and L.W. Rooney eds. Woodhead:Cambridge.

Méndez-Montevalvo G., Solorza-Feria J., Velásquez del Valle M., Gómez-Montiel N., Paredes-López O., Bello-Pérez L.A. **2005**. Chemical composition and calorimetric characterization of hybrids and varieties of maize cultivated in México. *Agrociencia*. 39: 267-274.

Méndez-Montevalvo G., Sánchez-Rivera M.M., Paredes-López O., Bello-Pérez L.A. **2006.** Thermal and rheological properties of nixtamalized maize starch. *International Journal of Biological Macromolecules.* 40: 59-63.

Mudgil D., Barak S. **2013.** Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fibre: A review. *International Journal of Biological Macromolecules.* 61:1-6.

Narváez-González E.D., Figueroa-Cárdenas J.D. Taba S., Rincón-Sánchez F. **2006.** Kernel Microstructure of Latin American Races of Maize and Their Thermal and Rheological Properties. *Cereal Chemistry.* 83:605-610.

Narváez-González E.D., Figueroa-Cárdenas J.D., Taba S., Castaño-Tostado E., Martínez-Peniche R.A., Rincón-Sánchez F. **2006.** Relationships between the microstructure, physicochemical features, and chemical composition of different maize accessions from Latin America. *Cereal Chemistry.* 83: 595-604.

Niu S., Zhou Y., Yu H., Lu C., Han K. **2017.** Investigation on thermal degradation properties of oleic acid and its methyl and ethyl esters through TG-FTIR. *Energy Conversion and Management.* 149: 495-504.

Obiro W., Sinha S., Naushad M. **2013.** V-amylase structural characteristics, methods of preparation significance and potential applications. *Food Reviews International.* 28:412-438.

Ochoa N.Y. **2017.** Híbridos no convencionales de maíz pozolero rojo con alto nivel de antocianinas adaptadas al Bajío. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias en Producción y Tecnología de Semillas. Instituto Tecnológico de Roque.

Ortiz S. **2006.** Determinación de la composición química proximal y fibra dietaria de 43 variedades criollas de maíz de 7 municipios del sureste del Estado de Hidalgo. Tesis para obtener el título de Licenciado en Nutrición. Instituto de Ciencias de la Salud.

Palacios-Fonseca A.J., Castro-Rosas J., Gómez-Aldapa C.A., Tovar-Benitez T., Millán-Malo B.M., Del Real A., Rodríguez-García M.E. **2013.** Effect of the alkaline and acid treatments on the physicochemical properties of corn starch. *Journal of Food.* 11: 67-74.

Paredes O., Guevara F., Bello L.A. **2006**. Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. México: Fondo de Cultura Económica.

Paredes-López O., Guevara-Lara F., Bello-Pérez L.A. **2009**. La nixtamalización. *Ciencias*. 92: 60-70.

Peat S., Whelan W., Thomas G. **1952**. Evidence of multiple branching in waxy maize starch. *Journal of the Chemical Society*. 4536-4538.

Peinado B., Almela L., Duchi N., Poto A. **2009**. Parámetros de calidad en la canal y en la carne de cerdo Chato Murciano. *Eurocarne*. 173: 64-80.

Pérez S., Bertoft E. **2010**. Review. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch*. 62: 389-420.

Preciado-Ortiz R.E., Vázquez-Carrillo M.G., Figueroa-Cárdenas J.D., Guzmán-Maldonado S.H., Santiago-Ramos D., Topete-Betancourt A. **2018**. Fatty acids and starch properties of high-oil corn hybrids during nixtamalization and tortilla-making process. *Journal of Cereal Science*. 83: 171-179.

Rojas-Molina I., Gutiérrez-Cortez E., Palacios-Fonseca A., Baños L., Pons-Hernández J.L. Guzmán-Maldonado S.H. Pineda-Gómez P., Rodríguez M.E. **2007**. Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*. 84: 304-312.

Ron-Parra J., Sánchez-González J.J., Jiménez A.A., Carrera-Valtierra J.A., Martín-López J.G., Morales-Rivera M.M., De la Cruz-Larios L., Hurtado S.A., Mena S., Rodríguez J.G. **2006**. Maíces nativos del Occidente de México I. Colectas 2004. *Scientia-CUCBA*. 8:1-139.

Sang, Y.; Bean, S.; Seib, P. A.; Pedersen, J. and Shi, Y. C. **2008**. Structure and functional properties of sorghum starches differing in amylose content. *J. Agric. Food Chem*. 56:6680-6685.

Santiago-Ramos D., Figueroa-Cárdenas J. de D., Véles-Medina J.J., Mariscal-Moreno R.M. **2017**. Changes in the thermal and structural properties of maize starch during nixtamalization and tortilla-making processes as affected by grain hardness. *Journal of Cereal Science*. 74:72-78.

Sefa-Dedeh S., Cornelius B., Sakya-Dawson E., Ohene E. **2004**. Effect of nixtamalization on the chemical and functional properties of maize. *Food Chemistry*. 86: 317-324.

Sotelo A., Argote R.M., Cornejo L., Escalona S., Ramos M., Nava A., Palomino D., Carreón O. **2007**. Medición de fibra dietética y almidón resistente: reto para alumnos del Laboratorio de Desarrollo Experimental de Alimentos (LabDEA). *Educación Química*. 19:42-49.

Tacer-Caba Z., Nilufer-Erdil D. **2018**. Resistant Starch. In G. Smithers (Ed.), *Reference Module in Food Science*. Amsterdam: Elsevier.

Tan I., Torley P.J., Halley P.J. **2008**. Combined rheological and optical investigation of maize, barley and wheat starch gelatinization. *Carbohydrate Polymers*. 72: 272-286.

Taylor J., Naushad M., Kruger J. **2015**. Developments in modulating glycaemic response in starchy cereal foods. *Starch*. 67: 79-89.

Tester R.F., Debon S.J.J. **2000**. Annealing of starch. A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 27: 1-12.

Tester R., Karkalas J., Qi X. **2004**. Review. Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*. 39: 151-165.

Tester R.F., Sommerville M.D. **2002**. The effects of non-starch polysaccharides on the extent of gelatinization swelling and α -amylase hydrolysis of maize and wheat starches. *Food Hydrocolloids*. 17: 41-54.

Vázquez-Carrillo M.G., Pérez-Camarillo J.P., Hernández-Casillas J.M., Marruf-Díaz M.L., Martínez-Ruiz E. **2010**. Quality of grain and tortilla made with local maize landraces from the high valleys and the valley of Mezquital, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33:49-56.

Vázquez-Carrillo M.G., Santiago-Ramos D. **2013**. Physicochemical characteristics and pozole quality of Cacahuacintle maize processed by three methods. *Revista Fitotec*. 36: 357-366.

Wang S.S., Chiang W.C., Zhao B.L., Zheng X.Z., Kim I.H. **1991**. Experimental analysis and computer simulation of starch water interaction during phase transition. *Journal of Food Science*. 56:121-124.

Wang S., Li C., Copeland L., Niu Q., Wang S. **2015**. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 14:568-585.

Wang H., Wu Y., Wang N., Yang Li., Zhou Y. **2019**. Effect of water content of high-amylose corn starch and glutinous rice starch combined with lipid on formation of starch-lipid complexes during deep-fat frying. *Food Chemistry*. 278: 515-522.

Watson, S. A. 2003. "Description, Development, Structure, and Composition of the Corn Kernel." In *Corn: Chemistry and Technology*, edited by P. J. White and Lawrence A Johnson, 2nd ed., 69–106. St. Paul, Minn., USA: Association of Cereal Chemists, Inc.

Whellhausen E.J., Roberts L.M., Hernández E., Mangelsdorf P.C. **1951**. Razas de maíz en México, su origen, características y distribución. O. E. E., S. A. G. Folleto Técnico. Núm. 55.

Young S.N., Rocca L.A. **1998**. Starch Gelatinization: An X-ray Diffraction Study. *Cereal Chemistry*. 65: 443-446.

Yu Z., Wang Y-S., Chen H.H., Li Q.Q., Wang Q. **2018**. The gelatinization and retrogradation properties of wheat starch with the addition of stearic acid and sodium alginate. *Food Hydrocolloids*. 81: 77-86.

Zobel H.F. 1998. Molecules to Granules: A comprehensive starch review. *Starch*. 40: 44-50.

Zobel H.F. 1998. Starch crystal transformations and their industrial importance. *Starch*. 40: 1-7.