



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Efecto de la molienda húmeda y tamaño de partícula sobre las propiedades fisicoquímicas y reológicas de harinas de maíz.**

# **T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:**

**ANA KAREN DAMIAN NAVOR**

**ASESORA:**

**DRA. MA. DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO**

**COASESOR:**

**DR. SERGIO JIMÉNEZ AMBRIZ**

**CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN



ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO  
Jefa del Departamento de Titulación  
de la FES Cuautitlán.

DEPARTAMENTO DE  
EXÁMENES PROFESIONALES

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: Tesis y examen profesional

Efecto de la molienda húmeda y tamaño de partícula sobre las propiedades fisicoquímicas y reológicas de harinas de maíz.

Que presenta el pasante: Ana Karen Damian Navor

Con número de cuenta: 414100486 para obtener el título de: Ingeniera en Alimentos.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 07 de Abril de 2022.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M.A.D. Fernando Flores Benitez	
VOCAL	Dra. Elsa Gutiérrez Cortez	
SECRETARIO	Dra. María del Carmen Valderrama Bravo	
1er. SUPLENTE	I.A. Miriam Edith Fuentes Romero	
2do. SUPLENTE	I.A. Janeli Solís Garfías	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional

MCVB/cga\*

El trabajo fue realizado en la Unidad de Investigación de Granos y Semillas (UNIGRAS) y en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario I de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán con apoyo de los proyectos PAPIIT IT202119, Cátedra CI2231 y PAPIME 108022.

## *Dedicatorias*

A mi mami *Flor María*, las palabras no bastan para demostrar todo el amor y respeto que siento por ti, te admiro por ser la gran mujer que eres, porque jamás te rindes y sacas fuerzas de no sé dónde para salir adelante. Infinitas gracias por estar siempre a mi lado, por nunca dejarme sola, por tus palabras de aliento, por esos regaños por esas horas de desvelo y por creer en mí. Siempre serás un gran ejemplo para mí, gracias por hacer realidad este sueño, sin ti nada de esto hubiera pasado, porque eres y serás pieza importante en cada paso que doy. Gracias por ser mi madre y amiga, por acompañarme en cada uno de mis tropiezos y alegrías. **TE AMO** por siempre Flower.

A mi papá *Fermín*, siempre tan rudo y estricto conmigo, pero sé que de no haber sido así, no hubiera realizado este sueño. Gracias por brindarme todos los recursos necesarios para culminar mis estudios profesionales. Porque jamás me dejas sola, porque desde siempre haces hasta lo imposible por darme lo que necesito. Gracias por enseñarme a ser responsable, puntual y dedicada en todas las cosas que realizo. Simplemente gracias por ser mi padre (no tan normal) pero el mejor del mundo. **TE AMO**.

A mi hermana *María Isabel*, contigo tuve la mejor infancia, gracias por soportar mis lloriqueos, los momentos de estrés y de frustración. Por las noches en vela, por esas tardes de película, porque, aunque a veces tenemos días malos siempre encontramos un motivo para morir de risa. Gracias por haberme convertido en tía de una personita tan bella. Recuerda que siempre podrás contar con todo mi apoyo, eres una gran mujer y admiro la fortaleza que tienes para salir adelante. Sé que eres y serás una excelente madre para Axel. Nunca te rindas, TE AMO “mejillón”.

A mi hermanito *Christopher Alexander* (Queso), con tu llegada diste un gran giro a nuestra vida, sé que serás un hombre de bien, a pesar de tu corta edad siempre aprendo algo nuevo de ti, porque sacas ese lado infantil que guardo en el interior y por ver películas que a nadie le gustan conmigo. Gracias por soportar mis malos ratos, por entenderme y hacerme sentir como una mamá para ti. Yo siempre te escuchare y estaré contigo cuando me necesites. Te Amo hasta el infinito y más allá.

A mi sobrino *Axel Isaac*, eres una caja de sorpresas, todos los días me demuestras la gran inteligencia que hay en ese pequeño cuerpo. Gracias por permitirme darte todo mi amor y cariño y hacerme creer que a los sobrinos se les quiere igual que a un hijo. Tu tía Ana te ama y siempre estará para ti cuando me necesites.

A mi tío *Fernando*, es un gran ser humano, que a pesar de las circunstancias jamás se da por vencido, usted sabe cuánto respeto y cariño le tengo. Gracias por formar parte de cada una de mis etapas en la vida, por su apoyo incondicional, por los consejos, los regaños. Recuerde que yo siempre estaré para usted y que jamás lo abandonaré. Lo admiro por ser tan valiente, gracias por creer en mí.

*Con todo mi amor, Karen.*

## *Agradecimientos*

A **Lupita**, por darme una de las mejores noticias de mi vida (mi ingreso a la UNAM), la mejor amiga que la vida me regalo, gracias por tu apoyo incondicional, por tener siempre las palabras adecuadas para cada situación, por entenderme a pesar de que a veces me equivoco y sobre todo porque eres muy importante en cada logro de mi vida. Eres un gran ejemplo a seguir, nunca te das por vencida, luchas siempre por tus sueños y eso es algo que admiro de ti. Gracias por demostrarme que la amistad verdadera existe, por ser una hermana más para mí y por jamás dejarme sola. I LOVE U <3

A mi linda enfermera **Ana Karen**, mi tocaya, mi confidente, clon mío, mi otro yo. Gracias por tu amistad, por tus palabras y por escuchar mis penas y alegrías. Sabes que te adoro con el alma. “Terminaste los deberes”

A mi **Ing.Lic. Kika**, la persona más inteligente y astuta que conozco, gracias por escucharme, por tus consejos, la amistad, cariño y confianza. Te quiero.

A mis amigos del **SEXYTEM**, **Ivonne**, **Araceli**, **Osvaldo** y **Amelia**, porque hicieron que mis años en preparatoria fueran los más bellos, gracias por todo.

A **Wendy**, nuestra historia es tan bonita, fuiste mi primer y mejor amiga en la universidad, siempre estas cuando más te necesito, gracias por brindarme tu amistad, tu confianza y por todos los consejos. Ocupas un lugar muy especial en mi corazón, te quiero un buen.

A **Gus**, por ser un gran amigo, por la confianza y por el apoyo en mis buenas o malas decisiones. Porque siempre me diste ánimos en la escuela y en especial para terminar este trabajo. Te quiero mucho.

A **Faby**, contigo compartí el sueño de conocer el mar, por comer ilegalmente en clases, por las risas que jamás faltaron en un momento serio. Y porque a pesar de que pasen los años siempre serás una buena amiga y estarás para darme un consejo. Te adoro Piña.

A **Lili-ana**, eres la persona más tranquila y madura que conozco, solo tú nos controlabas. Gracias por tus consejos y por siempre escucharme a pesar de ser muy “panque”. Te quiero.

A **Ángel** y **Salma** son la pareja más inteligente que conozco, gracias por compartir sus conocimientos con la banda y por hacer que los equipos en LEM II y V fueran muy divertidos. Los adoro Mylos.

A **Viry**, eres la peor, gracias por los días de jugar ahorcado en clase, “Wrande”, por tu confianza y sobre todo por brindarme tu amistad. Te quiero mucho Viiry´sloca.

A **Aarón, Sergio, Brenny y Johana** por enseñarme a jugar baraja en esos ratos libres, por compartir uno que otro recurse (con el buen Flowers), por las horas de “yolismo” y porque siempre teníamos algo de que reír, aunque estuviéramos en vuelta B.

A **Uri**, gracias al destino por cruzarte en mi camino, gracias por estar, por escucharme, por alentarme a ser mejor cada día y nunca rendirme. Por las risas y por los momentos compartidos que solo tú y yo entendemos. Te quiero mucho tlaxcalito.

A la **Familia Cruz Servín y Castañeda Carmona**, son como una segunda familia para mí, gracias por estar siempre al pendiente de cada paso que doy, por abrirme las puertas de su hogar y por su cariño. En especial al señor **Antonio Cruz**, que siempre me alentó a crecer profesionalmente, gracias hasta el cielo. Los admiro, respeto y quiero demasiado.

A la **MVZ Haydeé Nava Monroy**, mi jefecita, gracias por el tiempo compartido, el apoyo, la amistad y los consejos que me brindo.

Al **Lic. Alexis Cathi**, porque del odio al amor solo hay un paso, gracias por brindarme tu amistad, porque el solo escuchar tu risa hizo que el turno fuera mejor. Gracias por la terapia en el laboratorio, por alentarme a sacar este trabajo y hacer que crea en mí. Te quiero chiquito.

A las personas que he conocido en el mundo laboral en especial al **Ing. Iván Chávez, Ing. Macarena Nava, Ing. Carlos Esqueda** y el **Ing. Oswald Strempler**, que de no ser por ustedes la jornada no hubiera sido la misma, gracias por la amistad, las risas y la confianza que me brindaron. Los llevare en mi corazón por siempre, los quiero mucho.

A la **Dra. María del Carmen Valderrama Bravo**, por todo el apoyo y paciencia que siempre tuvo hacia mí, por sus comentarios, sus asesorías y por compartir sus conocimientos. Gracias por haber formado parte de este camino, desde el principio al fin, para la realización de este trabajo.

A la **I.A. Edith Fuentes Romero**, que fue parte de mi formación académica, por compartir sus conocimientos conmigo, por todas las enseñanzas, el apoyo y asesorías para la realización de este trabajo. Gracias por brindarme su amistad, la admiro y respeto.

A mis sinodales, **M.A.D. Fernando Flores, Dra. Elsa Gutiérrez y I.A. Janeli Solís** por sus asesorías, comentarios, observaciones y el tiempo invertido para la realización de este trabajo.

A la **Dra. Martha Quezada Viay**, por el apoyo técnico para la extracción de almidón y determinación de amilosa y amilopectina.

Al *Sr. Gustavo Pérez Luna*, por el apoyo en la etapa experimental.

Finalmente, a la *Universidad Nacional Autónoma De México* y por supuesto a la *Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán*, por haberme permitido formar parte de esta máxima casa de estudios, por el aprendizaje adquirido, las experiencias, los profesores, amistades y a todas aquellas personas que conocí a lo largo de mi carrera universitaria.

*Por siempre orgullo azul y oro.*

*Con respeto y mucho cariño, Karen Damian.*

*“Por mi raza hablara el espíritu”*

*“La vida es una obra de arte que no permite ensayos; por eso canta, ríe, baila, llora y vive intensamente cada momento de tu vida... antes de que el telón baje y la obra termine sin aplausos.”*

*Charles Chaplin*

## ÍNDICE

Resumen.....	1
Introducción.....	2
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Generalidades del grano de maíz .....	4
1.1.1 Historia y origen del maíz.....	4
1.1.2 Estructura del grano de maíz.....	4
1.1.3 Composición química del grano de maíz.....	5
1.1.4 Almidón.....	7
1.1.5 Producción y consumo de maíz.....	9
1.2 Proceso de Nixtamalización.....	11
1.2.1 Nixtamalización.....	11
1.2.2 Elaboración del nixtamal.....	12
1.2.3 Cambios en el almidón de maíz nixtamalizado.....	13
1.3 Harina de maíz nixtamalizado.....	14
1.4 Perfil de viscosidad o pastización.....	16
1.5 Reología de las masas.....	19
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....	25
2.1 Objetivos.....	25
2.1.1 Objetivo general.....	25
2.1.2 Objetivos particulares.....	25
2.2 Caracterización del grano de maíz.....	25
2.2.1 Determinación de humedad del grano de maíz.....	25
2.2.2 Índice de flotación.....	26

2.2.3	Peso hectolítrico.....	27
2.2.4	Tamaño del grano.....	28
2.2.5	Peso de 100 granos.....	28
2.3	Proceso de Nixtamalización.....	29
2.3.1	Determinación de humedad del nixtamal.....	32
2.3.2	Hidratación de las harinas.....	32
2.3.3	Determinación de humedad de las masas.....	33
2.4	Caracterización de las harinas.....	33
2.4.1	Determinación de Índice de Absorción de Agua (IAA) e Índice Solubilidad en Agua (ISA).....	33
2.4.2	Extracción de almidón.....	34
2.4.3	Determinación de amilosa y amilopectina en harinas.....	35
2.4.4	Microscopia electrónica.....	38
2.4.5	Análisis de perfil de pastización de las harinas.....	39
2.4.6	Reología de las masas de maíz nixtamalizado.....	39
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		41
3.1	Caracterización del grano.....	41
3.2	Caracterización de harinas.....	42
3.2.1	Índice de Absorción de Agua (IAA) e Índice de Solubilidad en Agua (ISA).....	42
3.2.2	Amilosa y amilopectina.....	44
3.2.3	Morfología de gránulos de almidón.....	46
3.2.4	Perfil de pastización de las harinas.....	50
3.2.5	Reología de las masas.....	52
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....		55
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		57

## **ÍNDICE DE TABLAS**

### **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

<b>Tabla 1.1</b> Distribución ponderal de las partes del grano de maíz.....	5
<b>Tabla 1.2</b> Composición química proximal de los granos de maíz (%) .....	6
<b>Tabla 1.3</b> Composición química proximal de distintos tipos de maíz.....	6
<b>Tabla 1.4</b> Propiedades fisicoquímicas de almidones de maíz.....	7
<b>Tabla 1.5</b> Contenido proximal especificado para harinas de maíz nixtamalizado.....	15

### **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

<b>Tabla 2.1</b> Clasificación de dureza del grano de acuerdo al índice de flotación.....	27
<b>Tabla 2.2</b> Clasificación del tamaño de grano por peso hectolítrico.....	28
<b>Tabla 2.3</b> Harinas de maíz.....	31
<b>Tabla 2.4</b> Preparación de reactivos para la determinación de amilosa.....	36
<b>Tabla 2.5</b> Preparación de la curva estándar de amilosa.....	38

### **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

<b>Tabla 3.1</b> Caracterización del grano de maíz.....	41
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

<b>Fig. 1.1</b> Estructura del grano de maíz.....	5
<b>Fig. 1.2</b> Estructura de amilosa.....	8
<b>Fig. 1.3</b> Estructura de amilopectina .....	9
<b>Fig. 1.4</b> Principales estados productores de maíz grano, 2016-2018 (Millones de toneladas) .....	10
<b>Fig. 1.5</b> Consumo aparente de maíz grano en México (millones de toneladas)...	11
<b>Fig. 1.6</b> Método antiguo para elaboración de tortillas.....	12
<b>Fig. 1.7</b> Representación de los cambios en el almidón durante el calentamiento en exceso de agua.....	14
<b>Fig. 1.8</b> Perfil de viscosidad de almidón nativo.....	18
<b>Fig. 1.9</b> Comportamiento de un material sólido que obedece la Ley de Hooke.....	20
<b>Fig. 1.10</b> Comportamiento de un material líquido que obedece a Ley de Newton.....	21
<b>Fig. 1.11</b> Pruebas dinámicas oscilatorias.....	22

### CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

<b>Fig. 2.1</b> Determinación de humedad en grano de maíz.....	26
<b>Fig. 2.2</b> Índice de flotación.....	27
<b>Fig. 2.3</b> Peso hectolítrico.....	27
<b>Fig. 2.4</b> Tamaño de grano.....	28
<b>Fig. 2.5</b> Diagrama de proceso de nixtamalización de granos de maíz.....	29
<b>Fig. 2.6</b> Proceso de nixtamalización de maíz.....	30
<b>Fig. 2.7</b> Obtención de masas de maíz.....	30
<b>Fig. 2.8</b> Secado de masas.....	31
<b>Fig. 2.9</b> Molienda seca.....	32

<b>Fig. 2.10</b> Determinación de humedad del nixtamal.....	32
<b>Fig. 2.11</b> Hidratación de harinas.....	33
<b>Fig. 2.12</b> Humedad de las masas.....	33
<b>Fig. 2.13</b> Determinación de IAA e ISA.....	34
<b>Fig. 2.14</b> Determinación de amilosa.....	38
<b>Fig. 2.15</b> Microscopia electrónica en un microscopio electrónico de barrido JEOL Modelo JSM-6010LA.....	39
<b>Fig. 2.16</b> Determinación de viscoelásticidad de masas con un Reometro (RT 20 Haake New Castle, USA).....	40

### **CAPITULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

<b>Fig. 3.1</b> Resultados de IAA. Medias con letras iguales no tienen diferencia significativa.....	42
<b>Fig. 3.2</b> Resultados de ISA. Medias con letras iguales no tienen diferencia significativa.....	43
<b>Fig. 3.3</b> Resultados de % de amilosa.....	44
<b>Fig. 3.4</b> Resultados % de amilopectina.....	45
<b>Fig. 3.5</b> Tamaño del gránulo de almidón de maíz.....	46
<b>Fig. 3.6</b> Micrografía de almidón de maíz.....	49
<b>Fig. 3.7</b> Perfil de viscosidad 0.5-1M= harina de maíz con criba de 0.5 mm y 1 molienda húmeda, 0.5-2M= harina de maíz con criba de 0.5 mm y 2 moliendas húmedas, 0.5-3M= harina de maíz con criba de 0.5 mm y 3 moliendas húmedas.....	50
<b>Fig. 3.8</b> Módulo elástico de masas de maíz nixtamalizado.....	53
<b>Fig. 3.9</b> Módulo viscoso de masas de maíz nixtamalizado.....	53

# RESUMEN

La producción industrial de harina nixtamalizada está basada en el método tradicional de nixtamalización, sistematizado a una producción a gran escala. El proceso incluye básicamente las etapas de recepción, selección, limpieza, almacenamiento del grano, cocimiento alcalino, molienda del grano cocido y la obtención de la masa deshidratada, cernida, clasificada y envasada. En el presente trabajo se realizó un estudio de la molienda húmeda y tamaño de partícula sobre las propiedades fisicoquímicas y reológicas en harinas de maíz. Se caracterizó el grano, mediante las determinaciones de humedad, índice de flotación, peso hectolítrico, tamaño de grano y peso de cien granos para determinar la calidad del grano de maíz con base a la NMX-FF-034-1995, así como el tiempo de cocción para el proceso de nixtamalización. Después de obtener el grano nixtamalizado se le determinó la humedad, se elaboraron las harinas de maíz con 3 diferentes moliendas húmedas y utilizando 3 tamaños de criba (0.5, 0.8 y 1 mm) para obtener finalmente 9 harinas con diferentes características, a las cuales se les realizó una prueba de hidratación para convertir a masa y determinar la humedad de cada una de ellas. Posteriormente se caracterizaron las harinas de maíz con pruebas de índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA), se aisló almidón de maíz de las 9 harinas, para la prueba de determinación de amilosa y amilopectina, microscopía electrónica con ayuda de un microscopio electrónico de barrido para observar los cambios en el los gránulos de almidón y su tamaño. Por último, se llevó a cabo un análisis de perfil de pastización de las harinas y reología de las masas de maíz nixtamalizado donde se observaron los cambios de viscosidad, gelatinización y retrogradación del almidón de maíz en cada una de las 9 harinas empleadas para el estudio.

# INTRODUCCIÓN

Una de las industrias molineras que está creciendo a mayor ritmo es la productora de harinas nixtamalizadas. La industrialización nació a mediados del siglo XX en México, la cuna de los productos nixtamalizados. Actualmente, uno de los productos alimenticios industriales que ha tenido mayor relevancia, es la harina nixtamalizada para la elaboración de tortillas, la cual se realiza mediante la molienda del nixtamal y posteriormente un secado para hacerlas pasar por una molienda en seco, seguido de un tamizado que clasificará las partículas con diferentes granulometrías y aplicaciones. La versatilidad actual de harinas nixtamalizadas ha hecho que su consumo vaya en aumento, debido a que es necesario únicamente rehidratarla para obtener masa a partir de la cual se elaboran tortillas y por ende todos los derivados de la misma. La masa nixtamalizada es una mezcla constituida por los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) mezclados con gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, gránulos intactos, partes de endospermo y lípidos. Las partículas de las masas tienen cantidades significativas de gránulos libres de almidón con bajo contenido de proteína, mientras en las harinas de maíz nixtamalizadas las partículas tienen una cantidad de almidón y proteínas similar a la presente en el endospermo del grano de maíz (Gómez *et al.*, 1991).

Durante la nixtamalización, pequeñas cantidades de gránulos de almidón son gelatinizados y la mayor gelatinización se debe a la fricción de la molienda, en la cual también se dispersan parcialmente los gránulos hinchados dentro de la matriz, los que actúan como un adhesivo que mantiene unidas las partículas de masa (Rooney *et al.*, 1999). Una ventaja de usar harinas de maíz nixtamalizado es su flexibilidad para la producción de tortillas, tortilla chips, frituras, entre otras. Otras ventajas de la harina incluyen su fácil transporte y almacenamiento, así como un período de vida útil mayor que el de la masa fresca para hacer tortillas. Reduciendo considerablemente el costo de mano de obra, la inversión para equipo, los problemas asociados con la adquisición del grano de maíz y la generación de desechos durante la elaboración del nixtamal (Gómez *et al.*, 1987).

La calidad de las harinas nixtamalizadas está en función del color, granulometría, absorción de agua, grado de gelatinización del almidón, textura de la masa hidratada. Los factores más importantes son la absorción de agua y distribución de partículas. El almidón es el principal componente del grano de maíz (*Zea mays* L.) y por tanto influye mucho en la funcionalidad como ingrediente en los diferentes usos de la industria alimentaria.

Un factor que afecta la distribución del tamaño del gránulo de almidón en el endospermo del grano son las condiciones ambientales durante la etapa de crecimiento de los granos (Narváez-González *et al.*, 2007). Y como consecuencia de estos cambios en el endospermo influyen en las condiciones de proceso. El objetivo de este trabajo fue analizar el estado fisicoquímico y perfil de viscosidad de las harinas de maíz nixtamalizado en cuanto a la molienda y tamaño de partícula ya que se considera importante para la aplicación de tortillas o productos derivados.

# **1. MARCO TEÓRICO**

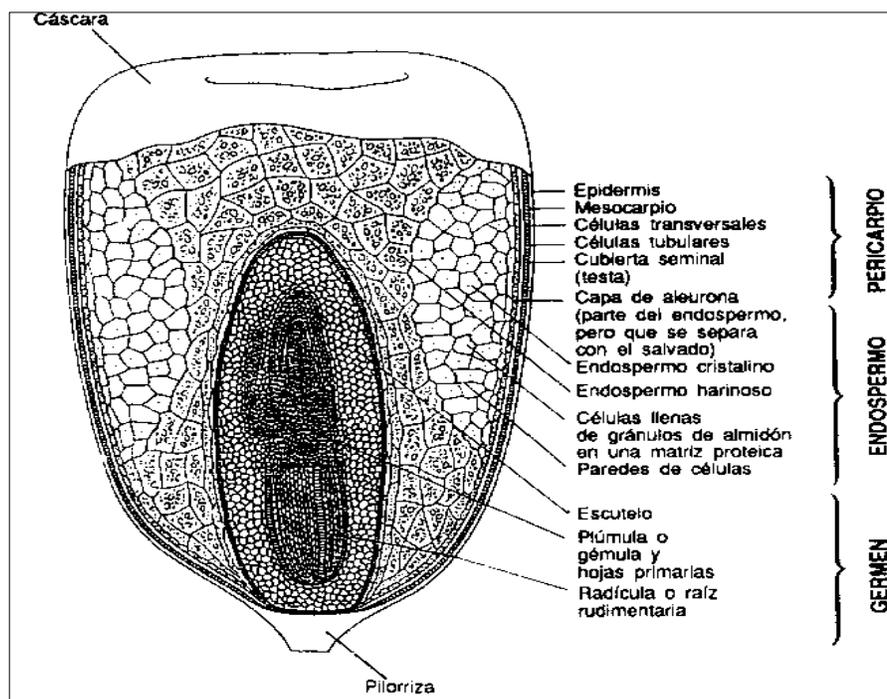
## **1.1 Generalidades del grano de maíz**

### **1.1.1 Historia y origen del maíz**

De acuerdo con la NMX-FF-034/1-SCFI-2002 es el grano obtenido de la familia de las gramíneas cuyo nombre científico es *Zea mays* L. El maíz es un cereal nativo de América, siendo Mesoamérica el centro original de domesticación. Los granos de maíz están constituidos principalmente de tres partes: el pericarpio, el endospermo y el germen. El pericarpio es la piel externa que sirve como elemento protector. El endospermo, es la reserva energética del grano y ocupa hasta el 80% del peso del grano. El germen contiene una pequeña planta en miniatura, además de grandes cantidades de energía en forma de aceite, que tiene la función de nutrir a la planta cuando comienza el período de crecimiento, así como otras muchas sustancias necesarias durante el proceso de germinación y desarrollo de la planta (Asturias, 2004).

### **1.1.2 Estructura del grano de maíz**

El peso del grano puede variar mucho, de aproximadamente 19 a 30 g por cada 100 granos. El grano de maíz se denomina carióspside y este posee 4 partes principales: el pericarpio o cascara, el endospermo, el germen y pedicelo que es el tejido inerte que une el grano al olote (FAO, 1993). En la Fig. 1.1 se muestra la estructura del grano de maíz.



**Fig. 1.1 Estructura del grano de maíz.**  
**Fuente: FAO, 1993**

La distribución ponderal de las 4 principales partes del grano de maíz se resume como se muestra en la Tabla 1.1

**Tabla 1.1 Distribución ponderal de las partes del grano de maíz.**

Estructura	Porcentaje (%)
Pericarpio	5-6
Aleurona	2-3
Endospermo	80-85
Germen	10-12

**Fuente: FAO 1993**

### **1.1.3 Composición química del grano de maíz**

Como se muestra en la Tabla 1.2, las partes principales del grano de maíz difieren considerablemente en su composición química. Cabe resaltar que los porcentajes señalados en la tabla son una aproximación general de la composición del grano, debido a que existen diferencias en la cantidad de nutrientes entre las distintas especies (FAO, 2001).

**Tabla 1.2 Composición química proximal de los granos de maíz (%).**

<b>Componente químico</b>	<b>Pericarpio</b>	<b>Endospermo</b>	<b>Germen</b>
<b>Proteínas</b>	3.7	8.0	18.4
<b>Extracto etéreo</b>	1.0	0.8	33.2
<b>Fibra cruda</b>	86.7	2.7	8.8
<b>Cenizas</b>	0.8	0.3	10.5
<b>Almidón</b>	7.3	87.6	8.3
<b>Azúcar</b>	0.34	0.62	10.8

**Fuente: Watson 1987**

La distribución ponderal de las partes del grano, su composición química concreta y su valor nutritivo tienen gran importancia cuando se procesa el maíz para consumo; respecto a esto, hay dos cuestiones de importancia desde la perspectiva nutricional: el contenido de ácidos grasos y el de proteínas (FAO, 1993).

Los porcentajes mostrados en la Tabla 1.2 son una aproximación general de la composición del grano de maíz, debido a que existen diferencias en la cantidad de nutrientes entre las distintas especies; la variabilidad es debida a diferencias genéticas y ambientales. En la Tabla 1.3 se muestra la composición proximal de algunas variedades de maíz en porcentaje (FAO, 2001).

**Tabla 1.3 Composición química proximal de distintos tipos de maíz.**

<b>Tipo</b>	<b>Humedad</b>	<b>Cenizas</b>	<b>Proteínas</b>	<b>Fibra cruda</b>	<b>Extracto etéreo</b>	<b>Carbohidratos</b>
<b>Salpor</b>	12.2	1.2	5.8	0.8	4.1	75.9
<b>Cristalino</b>	10.5	1.7	10.3	2.2	5.0	70.3
<b>Harinoso</b>	9.6	1.7	10.7	2.2	5.4	70.4
<b>Amiláceo</b>	11.2	2.9	9.1	1.8	2.2	72.8
<b>Dulce</b>	9.5	1.5	12.9	2.9	3.9	69.3
<b>Reventador</b>	10.4	1.7	13.7	2.5	5.7	66.0
<b>Negro</b>	12.3	1.2	5.2	1.0	4.4	75.9

**Fuente: Cortéz y Altamirano 1972**

### 1.1.4 Almidón

El almidón es el principal constituyente del maíz (*Zea mays L.*) y las propiedades fisicoquímicas y funcionales de este polisacárido están estrechamente relacionadas con su estructura (Tetlow *et al.*, 2004).

El almidón es un polímero cuya estructura molecular se basa en la unión de moléculas de glucosa que están unidas entre ellas mediante enlaces  $\alpha$ -D-(1-4) y/o  $\alpha$ -D-(1-6), que forman sus dos macromoléculas principales: la amilosa y la amilopectina, (Sullivan *et al.*, 1992).

Los gránulos de almidón de maíz poseen características de forma y tamaño que los identifican (ver Tabla 1.4).

Tabla 1.4 Propiedades fisicoquímicas de almidones de maíz.

Almidón	Tamaño de gránulo ( $\mu\text{m}$ )		Amilosa (%)	Poder de hinchamiento a 95°C	Solubilidad a 95°C (%)	Gelatinización (°C)	Descripción general de los gránulos
	Intervalo	promedio					
Maíz Regular	5-25	15	26	24	25	62-80	Redondo poligonal
Maíz Ceroso	5-25	15	<1	64	23	63-74	Redondo, oval
Maíz alto en amilosa	-	15	Hasta 80	6	12	85-87	Redondo

Fuente: Pomeranz, 1991

- **Amilosa:** Un polímero lineal con grado de polimerización de 100 a 1000 unidades de glucosa. Esta molécula no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal (Knutzon y Grove, 1994). Las moléculas de amilosa tienen un peso molecular promedio

de  $10^6$ , aproximadamente. La posición axial de los enlaces  $\alpha$  1-4 de las unidades de glucosa da a la molécula una forma helicoidal (Be-Miller y Hubert, 2007). El enlace de hidrógeno entre las cadenas alineadas causa la retrogradación y consecuentemente se produce una sinéresis (liberación de agua) después las cadenas alineadas forman los cristales que son resistentes a las enzimas. En la Fig. 1.2 se presenta la estructura de la amilosa.

### 1) AMILOSA

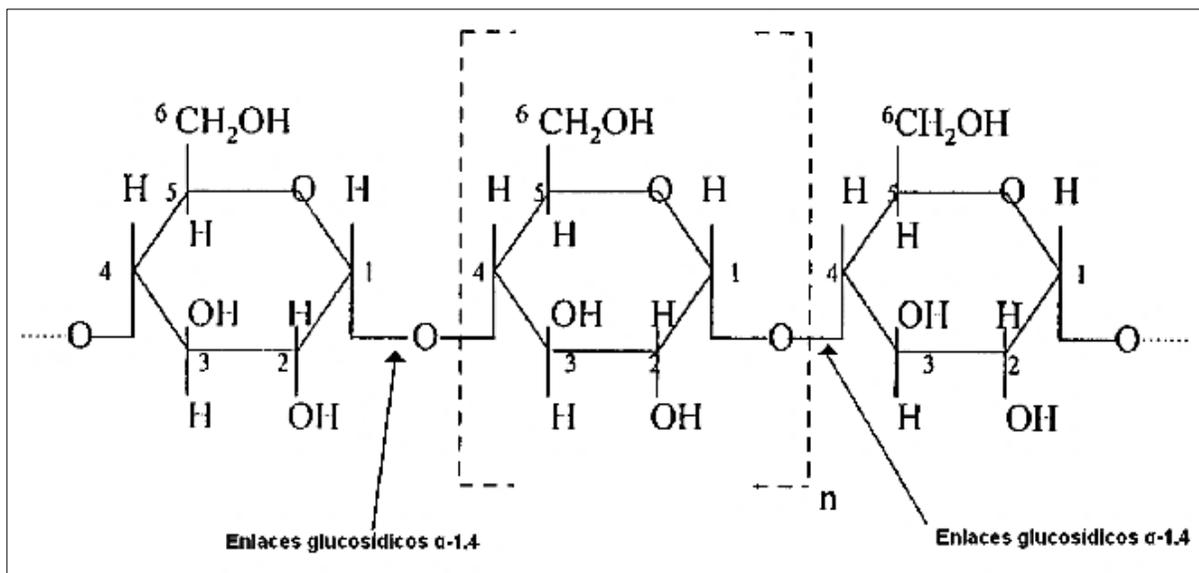


Fig. 1.2 Estructura de amilosa.  
Fuente: International Starch Institute, (1999)

- **Amilopectina:** Es un polímero semicristalino y altamente ramificado, formado por aproximadamente 595,238 unidades de D-glucopiranosas unidas mediante enlaces  $\alpha$ -(1- 4) que representan un 92-96 %; con puntos de ramificación unidos mediante enlaces  $\alpha$ -(1- 6) que presentan un 5-6 % de su estructura. Dichas ramificaciones se localizan aproximadamente cada 15 o 25 unidades de D-glucopiranosas, aunque el rango puede excederse a 19 o 31 unidades dependiendo del contenido de amilosa en el almidón (Biliaderis 1998; Mua y Jackson 1997; Tang *et al.*, 2002). En la Fig. 1.3 se presenta la estructura de la amilopectina.

## 2) AMILOPECTINA

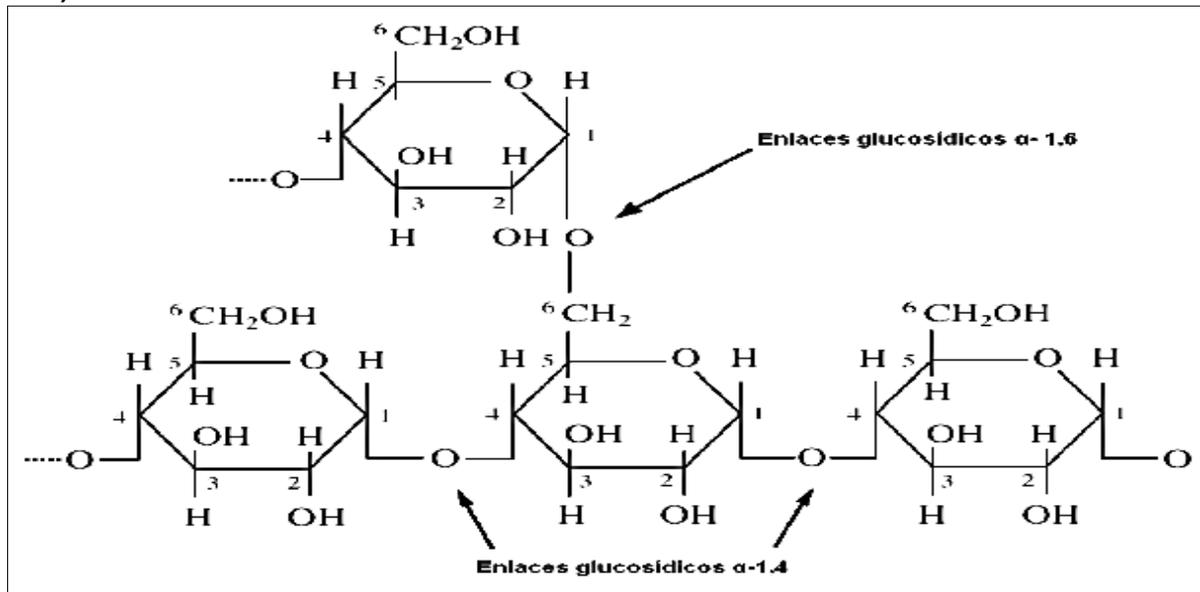


Fig. 1.3 Estructura de amilopectina.

Fuente: International Starch Institute, (1999)

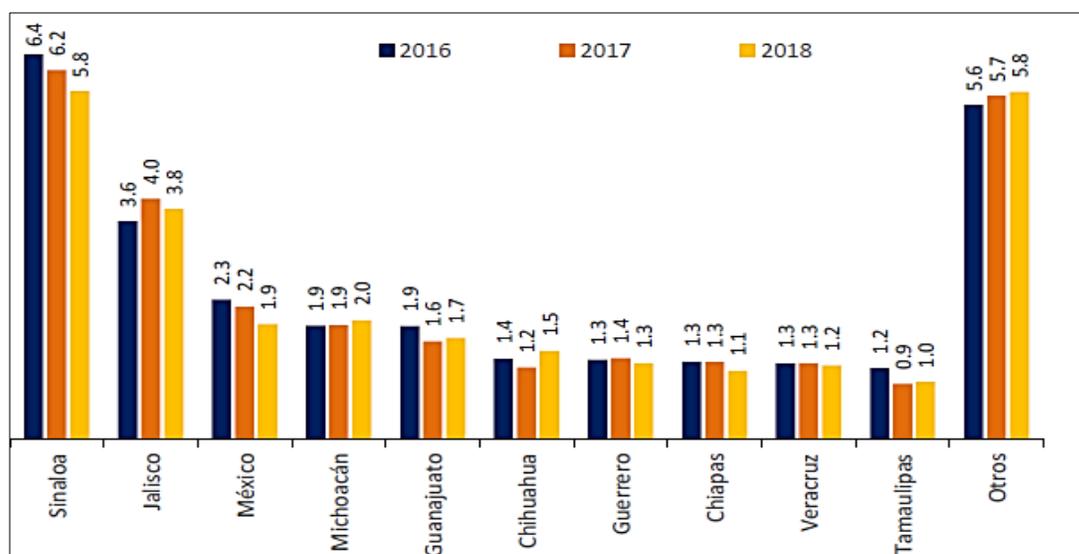
### 1.1.5 Producción y consumo del maíz

El maíz es el grano que más se produce en el mundo. Debido a sus cualidades alimenticias para la producción de proteína animal, el consumo humano y el uso industrial, se ha convertido en uno de los productos más importantes en los mercados internacionales. Su relevancia económica y social supera a la de cualquier otro cultivo. Adicionalmente, el cultivo y transformación del maíz es fuente de empleo y alimento para un número importante de personas en el mundo.

El maíz es el cultivo de mayor importancia en México, en el año agrícola 2018 participó con 35.1 % de la superficie cosechada de cultivos cíclicos y con 16.3 % del valor de la producción agrícola primaria del país.

Todas las entidades del país son productoras de maíz (ver Fig. 1.4); en el año agrícola 2018, cinco concentraron 56.2 % de la producción nacional: Sinaloa (21.4 %), Jalisco (14.2 %), Michoacán (7.3 %), Estado de México (7.1 %) y, Guanajuato (6.2 %). En Jalisco, el segundo productor nacional de maíz, en el año agrícola 2018 se obtuvo una producción de 3.8 millones de toneladas, lo que significó una reducción de 4.4 % respecto al año previo.

Lo anterior, debido a que la superficie cosechada se redujo de 593.2 miles de hectáreas en 2017 a 581.0 en 2018, y el rendimiento en temporal pasó de 6.7 a 6.5 toneladas por hectárea (FIRA, 2019).



**Fig. 1.4 Principales estados productores de maíz grano, 2016-2018 (Millones de toneladas).**

**Fuente: SIAP-SADER 2019.**

La producción de maíz grano se divide en blanco y amarillo. El maíz representa 86.94% de la producción y se destina principalmente al consumo humano. Esta producción satisface la totalidad del consumo nacional. El maíz amarillo se destina a la industria o la fabricación de alimentos balanceados para la producción pecuaria, esta producción satisface, solo 24% de los requerimientos nacionales.

El consumo nacional aparente de maíz grano muestra una tendencia creciente (ver Figura 1.5). En los últimos cinco ciclos comerciales (2013/14 - 2017/18) creció a una tasa promedio anual de 6.2 %: para el maíz blanco fue de 4.0 % y para el maíz amarillo de 9.6 %.

De acuerdo con las estimaciones del USDA, se prevé que para el ciclo comercial 2019/20 el consumo de maíz en México crezca 2.3 % respecto al ciclo previo, motivado fundamentalmente por un mayor uso del maíz para la alimentación animal. Así, se estima que la industria de alimentos balanceados crezca alrededor de 3.0 %. El consumo humano se ha ido contrayendo en los últimos años, atribuido a un lento crecimiento económico, el deterioro relativo de los ingresos de la población,

aumento de los precios de la tortilla y al cambio en el patrón de consumo, especialmente en las ciudades.

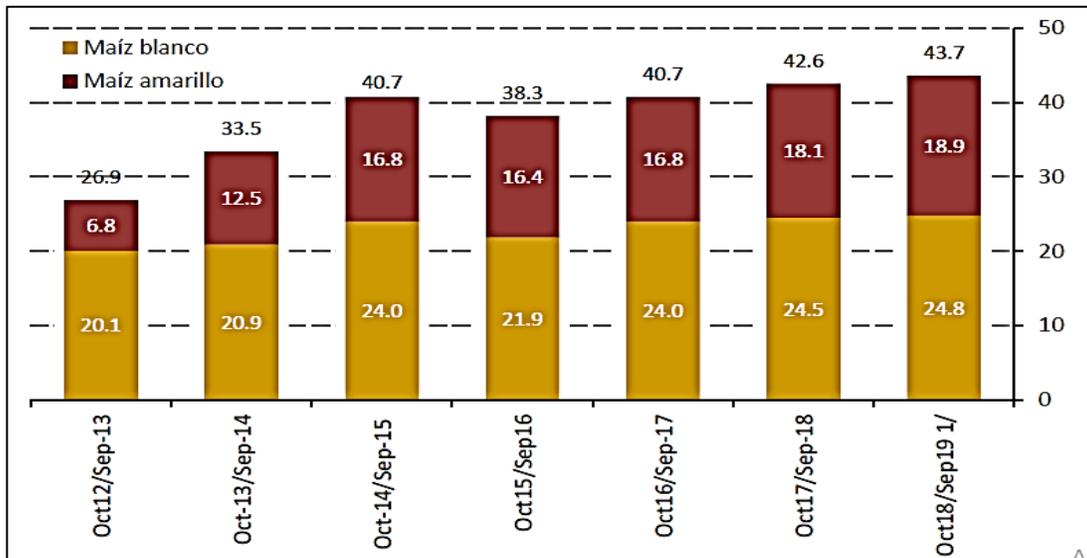


Fig. 1.5 Consumo aparente de maíz grano en México (Millones de toneladas).

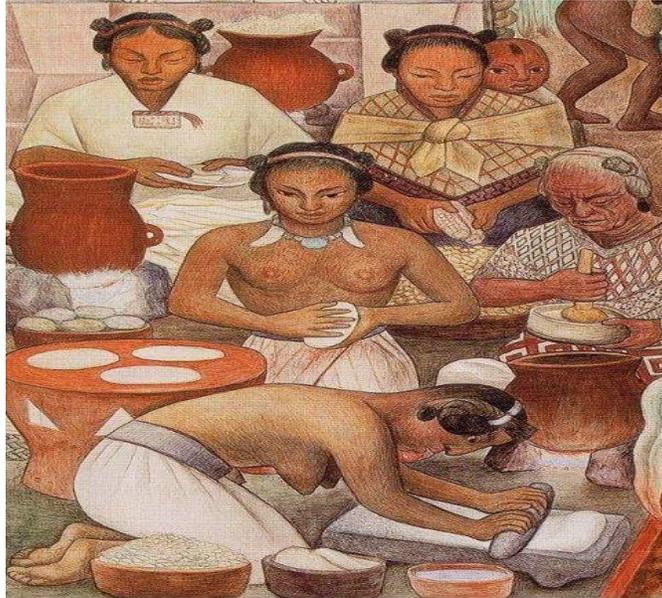
Fuente: SIAP-SADER 2019

## 1.2 Proceso de Nixtamalización

### 1.2.1 Nixtamalización

La nixtamalización es un método ancestral para preparar masa de maíz para tortillas (ver Figura 1.6), la palabra proviene de los vocablos náhuatl *nextli*, o cenizas de cal, y *tamalli*, que significa masa de maíz cocido el proceso de la nixtamalización se ha transmitido de generación en generación en Mesoamérica, y todavía se utiliza como en tiempos prehispánicos (García, 2004).

La nixtamalización es un proceso térmico que requiere de una combinación de temperatura y tiempo para lograr los cambios adecuados en los granos de maíz para su uso en la elaboración de alimentos (Méndez-Montealvo *et al.*, 2008). La dureza del grano así como su composición son factores que influyen las variables del proceso de nixtamalización, en particular el tiempo de cocción (Sahai y Jackson, 2001).



**Fig. 1.6 Método antiguo para elaboración de tortillas.**  
**Fuente: Díaz-Manrique 2017**

### **1.2.2 Elaboración del nixtamal**

En el proceso tradicional se hierva una porción de maíz en agua y con 1-3% de cal por un tiempo de 20 a 40 minutos. El tiempo de cocción depende de ciertos factores como la dureza del grano. Posteriormente se deja reposar al maíz de 8 a 12 horas. El agua de cocción, conocida como nejayote, se retira y el maíz se lava dos o tres veces con agua, para eliminar el exceso de cal. Finalmente el maíz se muele en un molino de piedras (molienda húmeda) para obtener la masa cuya textura servirá para la preparación de productos nixtamalizados (Paredes-López, 2009). La molienda húmeda es un proceso energético ineficiente porque parte de la energía eléctrica se transforma en ruido, energía vibratoria y calor dentro de las piedras (Geankoplis, 2005). La molienda húmeda de nixtamal se puede definir como un proceso termomecánico para integrar los componentes modificados con maíz para el proceso termoalcalino: pericarpio, germen y endospermo.

Un aspecto importante es definir si durante la cocción y el remojo hay granos pregelatinizados o granos parcialmente gelatinizados (primer fenómeno de gelatinización). Hasta donde se sabe, pregelatinizado significa que algunos granos de almidón se gelatinizaron previamente, mientras que los gránulos de almidón parcialmente gelatinizados son granos en los que se modificaron algunas regiones de la amilosa / amilopectina.

### 1.2.3 Cambios en el almidón de maíz nixtamalizado

Dentro de los cambios que se producen, los más importantes son los del almidón que influyen directamente en las cualidades de la masa y tortilla (Véles-Medina, 2004). Es importante recordar, que el almidón se encuentra en la naturaleza en forma de estructuras complejas denominadas gránulos, los cuales son relativamente densos y se hidratan difícilmente en agua fría y su capacidad espesante es solo lograda cuando en el proceso de hidratación interviene el efecto de calor. Es esta fase que se liberan algunas cadenas de amilosa y amilopectina que interactúan con el agua (Fennema, 2004).

Los fenómenos de gelatinización y retrogradación (ver Figura 1.7) determinan las características reológicas y funcionales de productos que contengan dentro de su estructura este componente (Salinas-Moreno *et al.*, 2003).

- **Gelatinización:** Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, pero se hidratan al calentarse en un medio acuoso, a este proceso se le conoce como gelatinización. Durante la nixtamalización se gelatinizan los gránulos más susceptibles, que generalmente son los de mayor tamaño, permaneciendo prácticamente sin gelatinizar los más resistentes o de menor tamaño (Gómez, *et al.*, 1990).
- **Retrogradación:** Este fenómeno se define como la insolubilización y precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa. La retrogradación es la alineación de las moléculas, principalmente de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente e interaccionan entre sí, por múltiples interacciones de sus grupos hidroxilos, mediante puentes de hidrógeno (Morris, 1990; Biliaderis, 1991; Mira *et al.*, 2007).

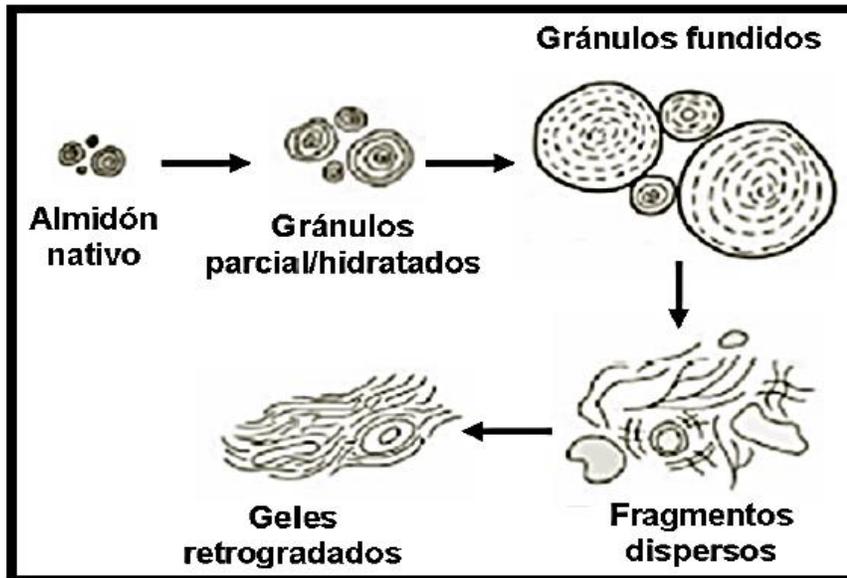


Fig. 1.7 Representación de los cambios en el almidón durante el calentamiento en exceso de agua.

Fuente: Rooney y Huang (2001)

### 1.3 Harina de maíz nixtamalizado

La industria de harina de maíz nixtamalizado en el país data de 1949, año en que inicio sus actividades del grupo industrial Molinos Azteca, S.A.; en 1951 Maíz Industrializado, S.A. (MINSIA) registro la primera patente para la producción de esta harina, la cual fue desarrollada por el Instituto Mexicano de Investigaciones Tecnológicas (IMIT) (Sánchez-Armas, 1996).

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-F-046-S-1980, la harina de maíz nixtamalizado se define como el producto que se obtiene de la molienda de los granos de maíz (*Zea mays*) sanos, limpios y previamente nixtamalizados y deshidratados siguiendo el proceso tradicional de nixtamalización, (se escurren los granos nixtamalizados, quedando listos para la elaboración de la harina, previo lavado y deshidratación), y que cumpla con las siguientes especificaciones fisicoquímicas:

- Color: Debe ser blanco amarillento o característico de la variedad de grano empleado.
- Olor: Debe ser característico y no presentar signos de rancidez u otro olor extraño.

- Sabor: Debe ser característico del producto y no tener ningún sabor extraño.
- Aspecto: Debe ser granuloso con una finura tal que el 75 % como mínimo pase a través de un tamiz de 0.250 mm de abertura de malla, tamiz No. 24 M.-60 US.

La harina de maíz nixtamalizado debe cumplir con las especificaciones físicas y químicas (refiriéndose a base seca) señaladas en la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5 Contenido proximal especificado para harinas de maíz nixtamalizado.**

<b>Especificaciones</b>	<b>Mínimas</b>	<b>Máximas</b>
<b>Humedad</b>	-	11.0
<b>Proteínas (Nitrógeno x 6.25)</b>	8.0	-
<b>Cenizas</b>	-	1.5
<b>Extracto etéreo</b>	4.0	
<b>Fibra cruda</b>	-	2.0

**Fuente: NMX-F-046-S-1980**

Las especificaciones microbiológicas, mencionan que el producto no debe contener microorganismos patógenos, ni más de 1000 UFC/g de hongos, ni biotoxinas fuera de los límites que la Secretaria de Salud especifica. Debe, además, estar libre de plaguicidas y no exceder el límite del contaminante metálico Arsénico en 0.3 mg/Kg (ppm) máximo, estar libre de fragmentos de insectos, pelos y excretas de roedores, así como de cualquier otra materia extraña. Los ingredientes básicos de preparación deben ser: maíz, agua y cal.

Las cualidades que se analizan en las harinas de maíz nixtamalizado permiten describir su funcionalidad y su calidad. Las propiedades físicas nos permiten conocer el comportamiento de la harina y determinar si es funcional para el uso al que se está destinando. Por ejemplo, a través del tamaño de partícula se conoce si el maíz con el que se trabaja es duro o suave. Por otra parte, los valores de ISA (Índice de Solubilidad en Agua), IAA (Índice de Absorción de Agua) son indicadores de que tan cocido está el maíz y cuánto daño presenta el material; ya que, si existe

mayor daño en el almidón, la harina tendera a absorber más agua, reflejándose en el rendimiento de masa (Contreras-Jiménez, 2009).

El proceso de nixtamalización consiste en cocinar los granos de maíz en agua que contiene hidróxido de calcio, después el nixtamal está listo para la molienda. La molienda es una operación que reduce el volumen promedio de las partículas sólidas; eso implica no solo la reducción de tamaño, así como la transformación fisicoquímica del material granular crudo (Leewatchararongjaroen y Anuntagool, 2016) en gránulos sólidos debido a la combinación de diferentes fuerzas que actúan durante la molienda. Las fuerzas aplicadas pueden ser compresión, impacto o cizallamiento (Weber y Langlois, 2010), en esta etapa, es importante tener en cuenta que la magnitud de la fuerza y el tiempo de aplicación afectan el grado de molienda logrado así como las propiedades de los productos finales.

La distribución del tamaño de partícula y sus propiedades intrínsecas se consideran los criterios más importantes para las aplicaciones de harina de maíz (Gómez *et al.*, 1991). Montemayor y Rubio (1983) encontraron que generalmente se cree que las partículas pequeñas son responsables de la mayor parte de la absorción de agua, la cohesión, la plasticidad y la suavidad de la masa. Sahai *et al.* (2001) estudiaron la harina comercial instantánea de maíz y descubrieron que hay una mezcla de partículas que exhibe diferentes funciones. Para producir harina de maíz adecuada para alimentos y aplicaciones especiales, generalmente se separa en base a partículas y se mezcla para obtener la distribución de tamaño deseada.

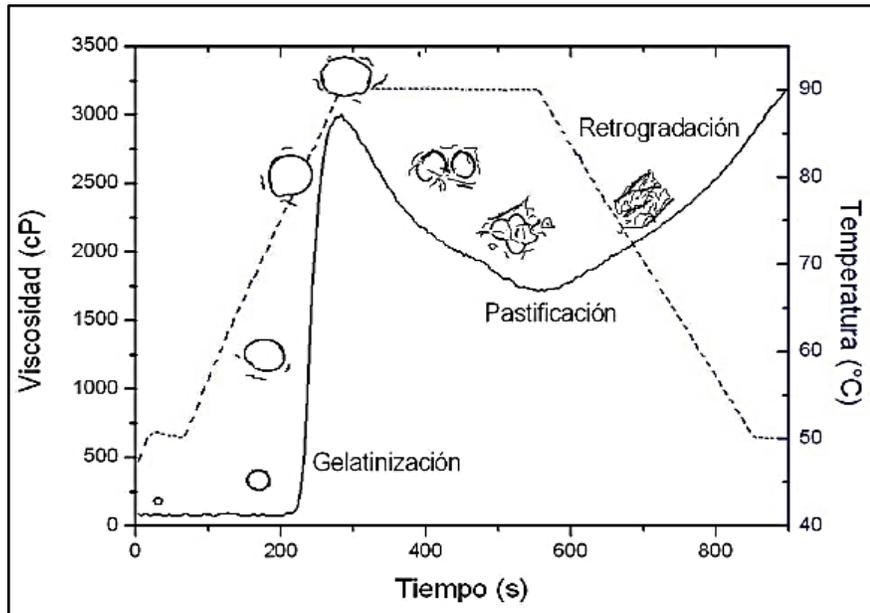
#### **1.4 Perfil de viscosidad o pastización**

Pastización: Es el proceso de hidratación exhaustiva de los gránulos de almidón, que se presenta pasando más allá de la gelatinización y que conduce a la disociación de las hélices de la amilosa. Esto involucra un incremento del volumen del gránulo, con la exudación de sus componentes moleculares y eventualmente se da su rompimiento (Atwell *et al.*, 1988; Choi y Kerr, 2004)

El perfil de pastización se rige principalmente por la transformación del almidón debido a la gelatinización del gránulo de almidón en el que se interrumpe el orden interno entre amilosa y amilopectina, cambiando el sistema de partículas de almidón diluidas en agua a un hidrogel (Rincón-Londoño *et al.*, 2016).

Dentro del germen, hay aproximadamente un 85% de ácidos grasos totales del maíz y estos constituyen aproximadamente el 30% del peso seco de esta estructura; aproximadamente, el 95.6% de los ácidos grasos son triglicéridos y el 1.7% son ácidos grasos libres (Watson, 2003). El proceso de nixtamalización modifica las características de calidad del aceite de maíz mediante la formación de compuestos oxidados derivados de los lípidos (Martínez-Flores *et al.*, 2006). El efecto del germen en el perfil de pegado ha sido estudiado recientemente por Vega *et al.*, (2017), descubrieron que la inclusión del germen (lípidos, proteínas) en la masa aumenta el pico de viscosidad y este hecho hasta ahora se atribuye al complejo lípido-amilosa.

En la Figura 1.8, se presenta el perfil característico de un almidón nativo; a medida que se incrementa la temperatura, se retiene mayor cantidad de agua y el gránulo empieza a hincharse, aumentando su volumen, a su vez que la parte amorfa se ha hidratado completamente, la cristalina inicia un proceso semejante, requiriendo mayor cantidad de energía.



**Figura 1.8 Perfil de viscosidad de almidón nativo.**

**Fuente: Sánchez (2007)**

La temperatura de gelatinización depende de varios aspectos como es el porcentaje de amilosa, la forma del gránulo y el tamaño. Por lo que cada almidón tiene un intervalo de gelatinización diferente, por ejemplo: para el almidón de maíz, la temperatura de gelatinización se encuentra entre 62-72 °C, para el trigo entre 53-63 °C (Zhang,2001; Li y Yeh, 2001; Wurzburg, 1986).

La importancia de caracterizar el perfil de viscosidad es que muchos alimentos que contienen almidón se cocinan con agua; este proceso provoca grandes cambios en la estructura y morfología de los gránulos del almidón (Henry *et al.*, 2009). Estos resultan en algunas propiedades modificadas del producto final. Generalmente hay cinco características de la muestra, que se obtienen con un perfil de pastización: viscosidad máxima y temperatura de viscosidad máxima; la facilidad de cocinas; la estabilidad de la pasta o la resistencia a descompostura; retroceso o viscosidad de la pasta fría, y estabilidad de la pasta cocida. Además, el valor de retroceso puede indicar la tendencia de retrogradación de la pasta de almidón por parte de los componentes lixiviados (Kong *et al.*, 2015)

## 1.5 Reología de las masas

El termino reología fue empleado por primera vez por E.C. Bingham y se refiere al estudio de la deformación ( $\gamma$ ) y flujo que presentan los materiales al ser sometidos a un esfuerzo ( $\sigma$ ) (Tanner, 1985). Las masas de maíz son materiales viscoelásticos, sus propiedades reológicas dependen de su composición y de las condiciones de proceso utilizadas en su elaboración. El comportamiento reológico de las masas se puede conocer seleccionando técnicas de medición apropiadas, estas pueden ser de tipo fundamental o empírico (Rao y Rao, 1993).

Diversos principios establecen la clasificación de los materiales con base en su comportamiento reológico, siendo dividido en tres categorías (García- Rejón, 1981):

- 1) Sólido ideal de Hooke, materiales que obedecen a la Ley de Hooke: En los cuales las propiedades viscoelásticas son una función de tiempo y no de la magnitud de la deformación ni de la velocidad de deformación.
- 2) Fluido ideal newtoniano, materiales que obedecen a la Ley de Newton.
- 3) Materiales viscoelásticos (No Hookeanos): Estos materiales exhiben propiedades mecánicas que son función del tiempo y de la magnitud del esfuerzo estático.

El comportamiento sólido de Hooke o comportamiento elástico y fluido newtoniano, son casos ideales, muchos de los sistemas alimenticios se encuentran entre estos dos y quedan incluidos dentro del comportamiento viscoelástico (Casas y Ramírez 1998).

El principio básico de la reología de solidos es la Ley de Hooke, que define el sólido ideal como aquel que se deforma instantáneamente y de forma proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada y se recupera totalmente al instante de retirar la fuerza (Rodríguez- Sandoval *et al.*, 2005).

Para un sólido completamente elástico, la Ley de Hooke establece:

$$\sigma = G\gamma \quad \text{Ec. 1.1}$$

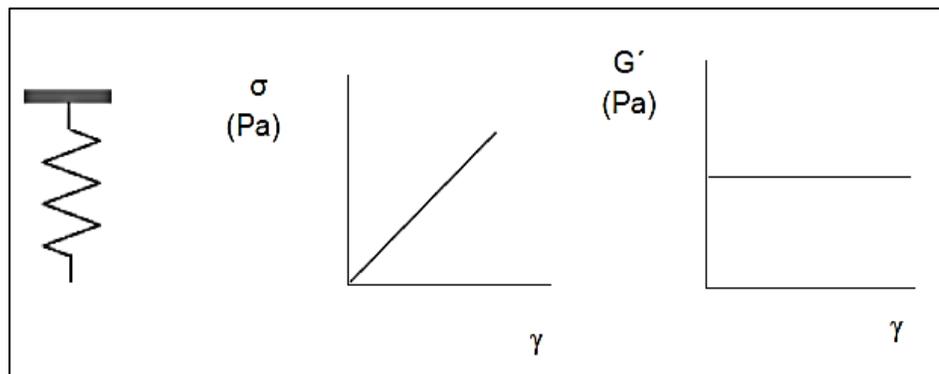
Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo de cizalla ( $\frac{N}{m^2}$ )

$G$  = Modulo elástico ( $\frac{N}{m^2}$ )

$\gamma$  = Deformación (adimensional)

La ley de Hooke es representada por un resorte que describe el módulo elástico y expresa un gráfico de esfuerzo vs deformación donde se obtendrá una línea recta, con una pendiente igual al módulo  $G'$  (ver Figura 1.9) y es independiente del esfuerzo (Goodwin y Hughes, 2000, Tadros, 2010).



**Fig. 1.9** Comportamiento de un material sólido que obedece la Ley de Hooke.

Fuente: Goodwin y Hughes, 2000, Tadros, 2010

La ley de Newton trata las propiedades de los líquidos viscoso ideales, contemplando que el esfuerzo aplicado es independiente de la deformación (Ferry, 1980) y su representación es a partir de un pistón como lo muestra la Figura 1.10.

Para un fluido completamente viscoso, la Ley de Newton de la viscosidad es representada:

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo de cizalla ( $\frac{N}{m^2}$ )

$\mu$  = Viscosidad (Pa \* s)

$\dot{\gamma}$  = Velocidad de cizalla ( $\frac{1}{s}$ )

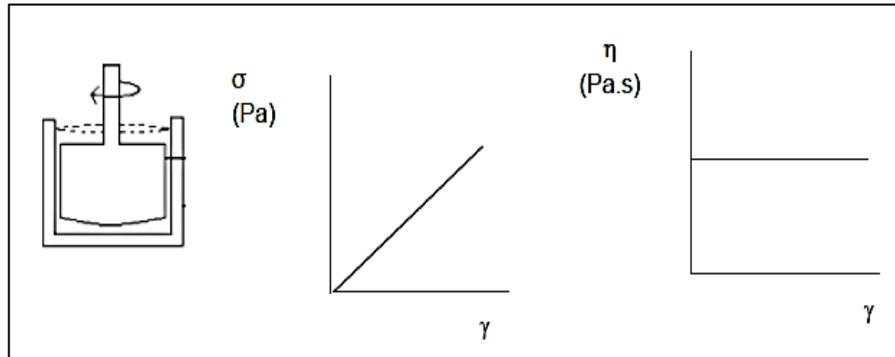


Figura 1.10 Comportamiento de un material líquido que obedece a la ley de Newton.

Fuente: Goodwin y Hughes, 2000, Tadros, 2010

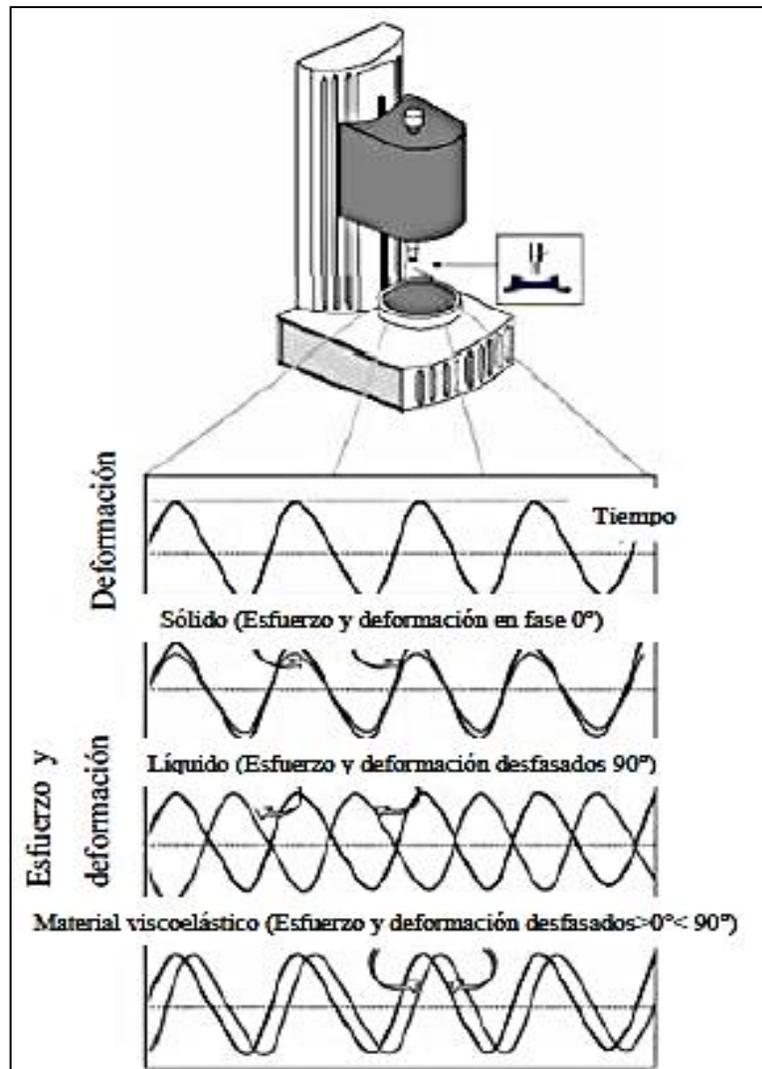
Los alimentos, en general presentan un comportamiento viscoso y elástico a la vez, en términos reológicos se conoce como viscoelasticidad. Los materiales que presentan esta propiedad se caracterizan por la presencia de una estructura tridimensional incompleta, que se destruye por la aplicación de un esfuerzo y sólo se recupera cuando el esfuerzo es parcialmente removido (Borwankar *et al.*, 1992).

Los métodos para evaluar las propiedades viscoelásticas de los alimentos se caracterizan por ser de baja deformación o bajo esfuerzo y se pueden dividir en dos categorías:

- Métodos estáticos: Entre los que se pueden mencionar pruebas de relajación de esfuerzo a deformación constante y la de esfuerzo constante (creep).
- Métodos dinámicos oscilatorios: Es la aplicación de un esfuerzo oscilatorio o deformación como variable de entrada, monitoreando la respuesta en esfuerzo o deformación resultante (dependiendo de la variable fijada).

Las pruebas dinámicas oscilatorias se realizan aplicando una pequeña deformación (o esfuerzo) sinusoidal, midiendo el esfuerzo (o deformación) resultante (ver Figura 1.11). Las pruebas oscilatorias pueden conducirse en tensión, compresión o corte. Los instrumentos comerciales operan generalmente en el modo de deformación de

corte, siendo el método predominante utilizado para la evaluación del comportamiento viscoelástico de los alimentos. La deformación de corte puede generarse empleando configuración de platos paralelos, cono y plato o cilindros concéntricos. Los ensayos con pequeñas amplitudes oscilatorias se utilizan en las pruebas dinámicas viscoelásticas (Gunasekaran y Ak, 2000).



**Figura 1.11 Pruebas dinámicas oscilatorias.**

**Fuente: Steffe, 1992**

Las propiedades reológicas de las masas de maíz permiten conocer características intrínsecas al proceso de obtención y la funcionalidad de la masa. Se puede caracterizar apropiadamente el comportamiento complejo de la masa nixtamalizada

con el uso de técnicas dinámicas que miden el componente de la parte sólida de la masa, denominado módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y el componente correspondiente viscoso de la materia, denominado módulo de pérdida ( $G''$ ) en cada ciclo de deformación (Contreras-Jiménez, 2015).

Entre los componentes reológicos reportados,  $G'$  se define como módulo de almacenamiento o elástico y es una medida de la energía recuperada por el material en un ciclo (Steffe, 1992). Es una función de la frecuencia y se puede expresar como:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde:

$\sigma_0$  = amplitud del esfuerzo de corte ( $\frac{N}{m^2}$ )

$\gamma_0$  = amplitud de la deformación (adimensional)

$\delta$  = ángulo de desfase (rad)

$G''$  es conocido como el módulo de pérdida y es una medición de la energía disipada por el material en un ciclo, en general se puede argumentar que describe el componente viscoso del material (Steff, 1992).

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad \text{Ec. 1.4}$$

Otra función empleada para describir el comportamiento viscoelástico es la  $\tan \delta$  (llamada tangente delta), ó tangente del ángulo de desfase, la cual también es una función de frecuencia:

$$\tan (\delta) = \frac{G''}{G'} \quad \text{Ec. 1.5}$$

La masa de maíz nixtamalizado es rica en almidón y es considerada un material viscoelástico. Ese comportamiento a nivel macroestructural depende en gran parte del proceso de fabricación, sus constituyentes y la interacción que existe entre ellos. A partir del perfil reológico se puede definir la influencia de los componentes en la masa de maíz y controlar la calidad del producto final, así mismo orientar el diseño y adaptación de nuevas tecnologías de proceso (Rodríguez-Sandoval et al., 2005).

Cornejo-Villegas et al. (2013) Reportaron los cambios fisicoquímicos, morfológicos y de viscosidad para harinas de maíz nixtamalizadas de acuerdo a los diferentes tamaños de partículas (números de malla US 30, 40, 60, 80 y 100) en función del tiempo de remojo de 0, 3, 5, 7 y 9 h. Utilizaron imágenes de microscopía electrónica de barrido para estudiar los cambios morfológicos de las harinas de maíz y su distribución de tamaños de partículas. Se utilizó visco-analizador rápido para estudiar los cambios en las propiedades de pegado de cada distribución de tamaño de partícula.

Los autores mencionan que las imágenes del estudio de microscopia de las harinas de maíz (malla USA 60) demuestran la presencia de partículas gelatinizadas, así como una nueva formación de cúmulos de almidón. Estos cúmulos son formados principalmente en la molienda húmeda.

En relación con el desarrollo de la viscosidad aparente el artículo menciona que, si el tamaño de las partículas disminuye, la viscosidad máxima aumenta, este hecho podría estar relacionado con el aumento de las áreas de contacto con el agua.

Los resultados que se obtuvieron en el estudio, con respecto a las interacciones entre los componentes del maíz y el tamaño de partícula durante la nixtamalización, contribuyen a comprender cómo controlar las características del almidón para llegar a la calidad deseada en harina de maíz.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Objetivos**

#### **2.1.1 Objetivo general**

Evaluar los cambios fisicoquímicos y de perfil de viscosidad de harinas de maíz nixtamalizado con tres diferentes moliendas húmedas y tamaños de partícula para analizar el comportamiento reológico de sus masas.

#### **2.1.2 Objetivos particulares**

1. Determinar el Índice de Absorción de Agua (IAA) e Índice de Solubilidad en Agua (ISA) en harinas de maíz cuantificando la cantidad de agua incorporada a la harina y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua para evaluar los cambios del almidón originados por la molienda y tamaño de partícula de las harinas.
2. Analizar la morfología de los gránulos de almidón mediante microscopía electrónica de barrido para relacionarlos con los cambios en el perfil de viscosidad del almidón.
3. Determinar los contenidos de amilosa y amilopectina de harinas de maíz a diferente número de molienda húmeda y tamaño de criba mediante pruebas colorimétricas.
4. Evaluar los cambios reológicos en masas de maíz obtenidas a diferente número de molienda húmeda y tamaño de criba (0.5, 0.8 y 1 mm) mediante pruebas de viscoelásticidad para conocer los diferentes cambios en cada tipo de harina.

### **2.2 Caracterización del grano de maíz**

#### **2.2.1 Determinación de humedad del grano de maíz**

De acuerdo con la NMX-FF-034/1-SCFI-2002 la humedad es definida como el agua que contiene el maíz, expresada en porcentaje de masa sobre base húmeda.

La muestra se secó en una estufa de aire (red LINE by BINDER) hasta peso constante a una temperatura de 100 a 102 °C por 72 horas (Fig. 2.1). El contenido de humedad se calculó por la ecuación 2.1.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 \quad \text{Ec. 2.1}$$

$W_1$ =Peso inicial de la muestra (g)

$W_2$ =Peso final de la muestra (g)



Fig. 2.1 Determinación de humedad en grano de maíz.

### 2.2.2 Índice de flotación

Este método se basa en el principio donde los granos duros son de mayor densidad y por lo tanto tales granos flotan en menor cantidad que los granos de menor densidad, en la solución de nitrato de sodio. (NMX-FF-034/1-SCFI-2002).

Se empleó una solución de nitrato de sodio al 41 %. Se colocó un volumen 300 mL de la solución preparada en un vaso de precipitados de 600 mL agregando 100 granos limpios (libres de impurezas), se dejó en reposo aproximadamente por un minuto para tomar la lectura (Fig. 2.2). El número de granos que ascendieron a la superficie se usó como el índice de flotación y con base a la Tabla 2.1, se determinó el tiempo de cocción en el proceso de nixtamalización ya que está directamente relacionado con el Índice de dureza para grano de maíz y tiempos de nixtamalización. \*La prueba se realizó por triplicado.



Fig. 2.2 Índice de flotación.

Tabla 2.1. Clasificación de dureza del grano de acuerdo con el índice de flotación.

Granos flotantes	Dureza	Tiempo de cocción (min)
0-12	Muy duros	45
13-37	Duros	40
38-62	Intermedios	35
63-87	Suaves	30
88-100	Muy suaves	25

Fuente: (NMX-FF-034/1-SCFI-2002).

### 2.2.3 Peso hectolítrico

Consiste en determinar el contenido de masa en un volumen y se expresa en kilogramos por hectómetro cúbico (kg/hL).

Se colocó 1 kg a 1.5 kg de maíz, en la tolva de la balanza hectolétrica (OHAUS), posteriormente se abrió el paso para que cayera el grano en el recipiente que se encuentra debajo de la balanza, se realizaron 3 cortes en zigzag para retirar el exceso de maíz sin hacer presión en el grano, se pesó el recipiente con el maíz y se determina el peso hectolétrico del grano (kg/hectómetro cúbico) (ver Fig. 2.3).



Fig. 2.3 Peso hectolétrico.

## 2.2.4 Tamaño del grano

Se midieron las dimensiones del grano de maíz (longitud, diámetro y espesor). Se tomó un lote de 100 granos de maíz limpios y sanos para medirlos, utilizando un vernier con precisión de 0.1 X 10 cm y obtener el diámetro medio geométrico (Dg), calculado por la ecuación 2.2 (Vilche *et al.*, 2003).

$$Dg = \sqrt[3]{l * d * t} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dg= Diámetro medio geométrico (mm)

d= Diámetro (mm)

l= longitud (mm)

t= Espesor (mm)



Fig. 2.4 Tamaño del grano.

## 2.2.5 Peso de 100 granos

De acuerdo con Salinas y Vázquez (2006), los granos pueden clasificarse de la siguiente manera (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Clasificación del tamaño de grano por peso hectolítrico.

Peso de cien granos (g)	Tamaño
>38	Grandes
33-38	Medianos
<33	Pequeños

Se eligieron 100 granos de maíz limpio y sano al azar, se colocaron en el vaso de precipitado y se pesaron en la balanza analítica (Sartorius Basic B310P).

## 2.3 Proceso de nixtamalización

En la figura 2.5 se muestra el diagrama de proceso de nixtamalización para la obtención de harinas.

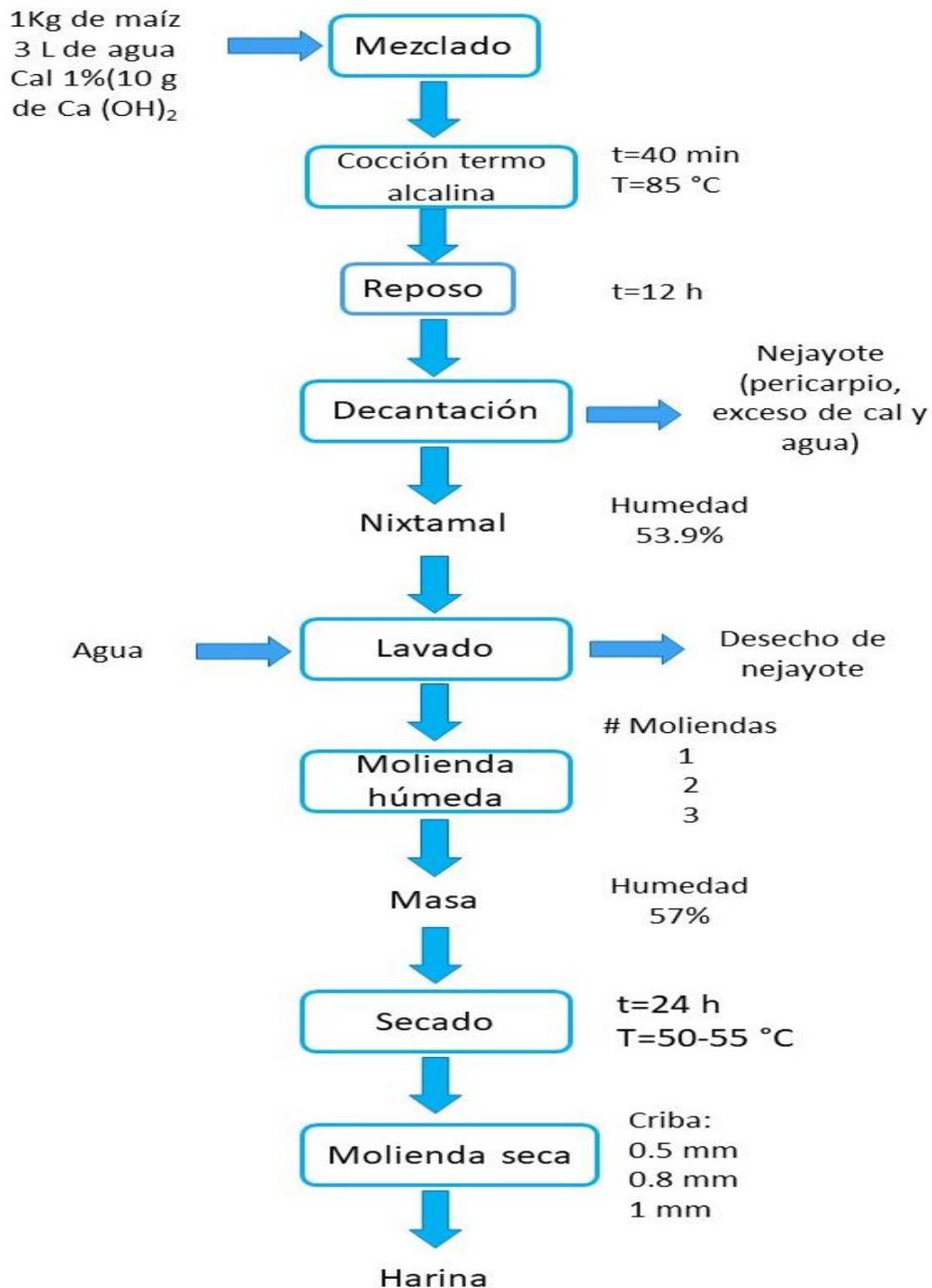


Fig. 2.5 Diagrama de proceso de nixtamalización de granos de maíz.

Para la obtención del nixtamal se pesó 1 kg de maíz, el cual se sometió a cocción en un recipiente de acero inoxidable con 1% de hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  y 3 L de agua, a una temperatura de 90 °C por 40 min (ver Fig. 2.6). El nixtamal obtenido se dejó reposar por 12 horas, posteriormente se separó el nixtamal del nejayote y se realizó un lavado con agua para eliminar los restos de pericarpio y exceso de cal.



**Fig. 2.6 Proceso de nixtamalización de maíz.**

El nixtamal obtenido se separó en 3 partes iguales para posteriormente someterlo a una molienda húmeda, en un molino de discos dentados (Estrella). La primera parte de nixtamal se le aplicó una sola molienda es decir solo paso una vez por el molino, la segunda parte de nixtamal una doble molienda y a la tercera parte una triple molienda (ver Fig. 2.7).



**Fig. 2.7 Obtención de masas de maíz.**

Se obtuvieron 600 g aproximadamente de cada una de las masas, las cuales se colocaron en charolas de aluminio, para someter a secado en la estufa de convección (FELISA 293) a una temperatura de 50-55 °C por 24 horas, de nuevo cada una de las 3 masas se dividieron en 3 partes iguales, obteniendo 9 tratamientos (ver Fig. 2.8).



**Fig. 2.8 Secado de masas.**

Para la obtención de las harinas, en un molino de martillos (Pulvex 200) se colocaron 3 diferentes tamaños de criba (0.5, 0.8, y 1 mm), obteniendo 9 tipos de harinas de maíz, con las características que se muestran en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Harinas de maíz.**

<b>Núm. Harina</b>	<b>Molienda (# de moliendas húmedas)</b>	<b>Criba (mm)</b>	<b>Tratamiento (simbología)</b> *M significa Molienda
1	1	0.5	1M-0.5
2	2	0.5	2M-0.5
3	3	0.5	3M-0.5
4	1	0.8	1M-0.8
5	2	0.8	2M-0.8
6	3	0.8	3M-0.8
7	1	1	1M-1
8	2	1	2M-1
9	3	1	3M-1



**Fig. 2.9 Molienda seca.**

### **2.3.1 Determinación de humedad del nixtamal**

Se tomaron 2 granos de maíz nixtamalizado y se colocaron en papel aluminio para posteriormente secar en la estufa de convección por 2 horas a 105°C (ver Fig. 2.10). La prueba se realizó por triplicado.



**Fig. 2.10 Determinación de humedad del nixtamal.**

### **2.3.2 Hidratación de las harinas**

Se pesaron 5 g de harina se colocaron en un vaso de precipitado, se vertió de 6.5 a 7 mL de agua con ayuda de la pipeta y se agregó a la harina hasta formar una masa. La prueba se realizó a las 9 harinas (ver Fig. 2.11).

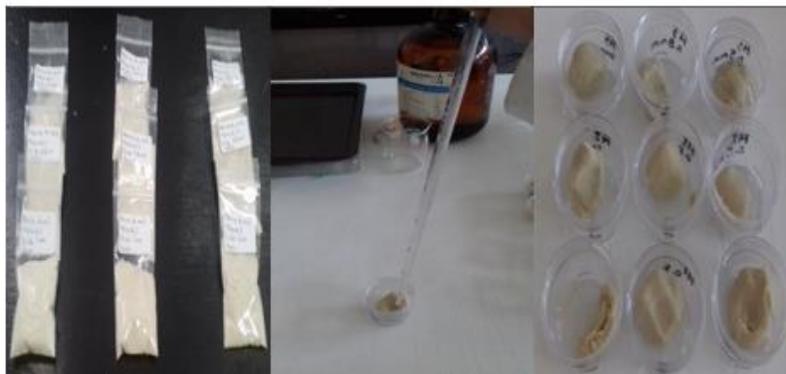


Fig. 2.11 Hidratación de harinas.

### 2.3.3 Determinación de humedad de las masas

Después de hidratar los 9 tipos de harinas y formar las masas se procedió a determinar la humedad de cada una de ellas en la estufa de convección (LINDBERG UE) a una temperatura de 105 °C por 2 horas (ver Fig. 2.12).



Fig. 2.12 Humedad de las masas.

## 2.4 Caracterización de las harinas

### 2.4.1 Determinación de Índice de Absorción de Agua (IAA) e Índice de Solubilidad en Agua (ISA)

Se determinaron los IAA e ISA en las harinas de acuerdo con la metodología descrita por Ayala-Rodríguez (2009). Este análisis permite cuantificar la cantidad de agua incorporada a la harina y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua a una temperatura de 30 °C. Cada muestra de harina de 0.1 g en base seca, fue colocada en tubos de propileno previamente tarados y se adicionaron 1.0 mL de agua destilada. Los tubos fueron colocados a baño María con agitación a 30°C

durante 30 min. Pasado este tiempo los tubos se centrifugaron a 3000 rpm en una centrifuga (Eppendorf, modelo 5417R) durante 10 min a 30 °C. El sobrenadante se vertió cuidadosamente en charolas taradas para evaporarse en estufa durante 40 minutos a 105 °C y se pesó el residuo de evaporación. Por otro lado, se determinó el peso del residuo de centrifugación por diferencia de peso de los tubos de propileno con el gel (ver Fig. 2.13). El IAA se expresó como una relación del peso del residuo de la evaporación y el peso seco de la muestra. Para calcular los índices se utilizaron las siguientes ecuaciones.

$$\text{IAA} = \frac{\text{Peso del residuo de centrifugación}}{\text{Peso de la muestra} - \text{Peso del residuo de evaporación}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$\% \text{ISA} = \frac{\text{Peso del residuo de evaporación}}{\text{Peso seco de la muestra}} \times 100 \quad \text{Ec. 2.4}$$



Fig. 2.13 Determinación de IAA e ISA.

#### 2.4.2 Extracción de almidón

Se pesaron 5 g de cada muestra de harina de maíz que se colocaron en vasos de precipitado, se agregó 30mL de etanol de 95 °GL y se agito por 1 min aproximadamente. La mezcla se filtró con 4 capas de malla del número 500. El filtrado se centrifugo en tubos de ensayo en la centrifuga (Sigma modelo 2-16K) por 5 min a 6000 rpm, se decantó el etanol para separarlo del almidón y se colocó en vasos de precipitado para posteriormente someterlas a secado en un horno de convección a 40 °C por 24 h.

### **2.4.3 Determinación de amilosa y amilopectina en harinas**

El almidón, es el componente principal de los granos de maíz, está formado por dos macromoléculas de diferente estructura: la amilosa- un polímero lineal de glucosas unidas por enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-4)-glucosídico, y ocasionalmente por medio de enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-6)- y amilopectina – un polímero altamente ramificado.

La amilosa en presencia de una solución de Lugol (triyoduro) forma un complejo de color azul con  $\lambda_{\max}$  a 620nm. Este protocolo propone utilizar la reacción de yoduro para cuantificar el contenido de amilosa en almidón de maíz, en una longitud de onda de 620 nm (Galicia *et al.*, 2012).

Se prepararon los reactivos a utilizar en la determinación de amilosa como se muestra en el siguiente cuadro.

**Tabla 2.4. Preparación de reactivos para la determinación de amilosa.**

<b>Reactivo/mezcla</b>	<b>Reactivos específicos</b>	<b>Preparación</b>	<b>Recomendaciones especiales</b>
Etanol, 95% (V/V)	Etanol (Merck Cat, 1.00983.2500)		
Hidróxido de sodio 1M	Hidróxido de sodio (Merck Cat. 1.06498.500)	Disolver 4 g de hidróxido de sodio en un matraz volumétrico de 100 ml con agua destilada y llevar al aforo.	
Hidróxido de sodio 0.1M		Diluir 10 mL de NaOH 1 M en un matraz volumétrico de 100 ml con agua destilada y llevar al aforo.	
Ácido acético 1M	Ácido acético glacial (Sigma-Aldrich Cat. A-6283-100mL)	5.67 ml en 100 ml de agua destilada	
Solución de Lugol	Yoduro de potasio (J.T. Baker 3162) Yodo (W.H. Curtin & Co. Cat. 35030)	-Pesar 2 g de KI. Agregar un poco de agua destilada hasta formar una solución saturada a continuación, agregar 0.2g de I <sub>2</sub> . -Asegurarse de que todo el yodo se haya disuelto antes de transferir la mezcla a un matraz volumétrico de 100 ml. -Agregar agua destilada para completar el volumen y homogenizar la solución.	Preparar diariamente Proteger de la luz
Estándar de amilosa 1mg/mL	Amilosa de papa tipo III Cat.	-Pesar 100 mg de amilosa en un matraz volumétrico de 100 ml.	Preparar cada semana y almacenar a 4°C

	Sigma No. A0512-5G	<p>-Agregar 1 ml de etanol al 95% y tratar de que se deslice por las paredes del matraz.</p> <p>-Agregar 9ml de hidróxido de sodio 1M y dejar reposar la mezcla de 20 a 24 h a temperatura ambiente.</p> <p>-Al día siguiente ajustar el volumen a 100 ml con agua destilada y agitar vigorosamente.</p>	
--	--------------------	--	--

#### Reacción colorimétrica

1. Se tomaron 50 mg de cada muestra y transfirieron a tubos de ensaye.
2. Se agregó 2 mL de ácido acético 1 M y agito en el vórtex.
3. Después se agregó 0.4 mL de solución de Lugol y se ajustó el volumen a 20 mL (18.4 ml de agua destilada). Se agito la mezcla y se dejó que desarrollara color por 20 minutos (proteger la mezcla de los tubos de luz).
4. Pipetear 100  $\mu$ l tanto de la solución de la curva estándar como de cada muestra y se transfirió a la celda. Se hizo la lectura a 620 nm en un espectrofotómetro marca Beckman Coulter modelo DU 530 Life Science UV/Vis.

#### Curva estándar

1. Se prepararon en tubos de ensayo soluciones de 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 mg de amilosa (ver Tabla 2.5), con un volumen final de 20 ml. Se agitaron en el vórtex antes de usarlas.
2. Se preparó la reacción colorimétrica utilizando 200  $\mu$ l de las diluciones (ver Fig. 2.14).

Tabla 2.5. Preparación de la curva estándar de amilosa.

Tubo núm.	Sol. Concentrada de amilosa 1mg/ml	Ácido acético (1Mol/ml) (ml)	Solución de yodo (ml)	NaOH (0.09 M)(ml)	Agua destilada (ml)
1	0.0	0.2	0.4	1	18.40
2	0.2	0.04	0.08	-	19.68
3	0.4	0.08	0.16	-	19.36
4	0.6	0.12	0.24	-	19.04
5	0.8	0.16	0.32	-	18.72
6	1.0	0.20	0.40	-	18.40

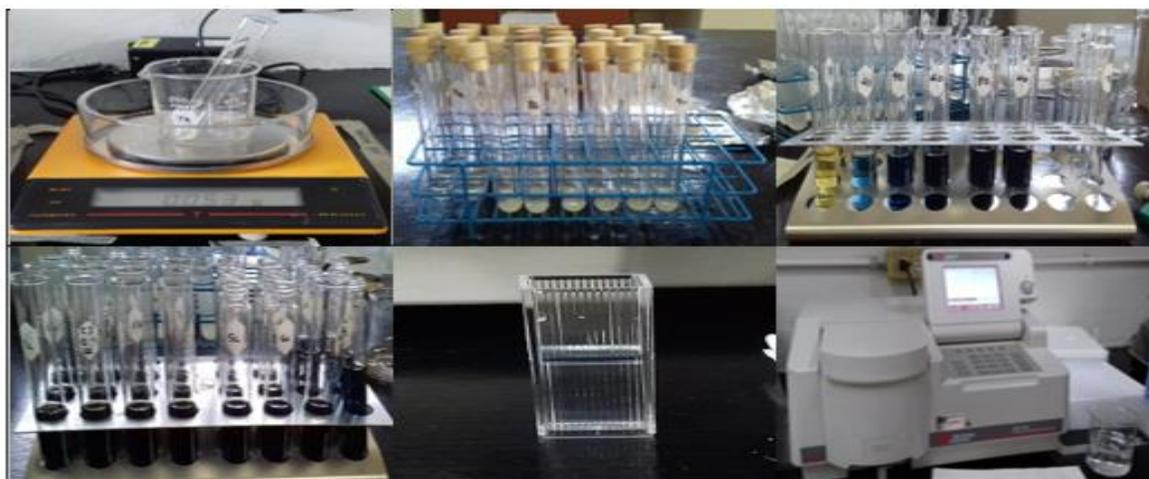


Fig. 2.14 Determinación de amilosa.

#### 2.4.4 Microscopia electrónica

Se trata de un microscopio que utiliza electrones que son bombardeados sobre la muestra para formar una imagen de alta resolución (ver Fig. 2.15). En este caso solo es necesaria una pequeña fracción de la muestra, la cual es recubierta con una capa de oro (Au), en condiciones de vacío. La muestra teñida es barrida con electrones enviados desde un cañón y un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en 3 dimensiones.

Se tomaron sub muestras de las 9 harinas de maíz, a las cuales se les aplicó un baño de oro (Au) en el Ionizador (Denton Modelo VACUUM, DESKV) por un tiempo de 480 s a 7  $\mu$ A. Las harinas se estudiaron utilizando un Microscopio electrónico de barrido (JEOL Modelo JSM-6010LA) con un haz de luz de 10 kV. Las sub muestras de harinas de maíz fueron montados en una placa de aluminio con ayuda de pegamento para su observación. Las imágenes fueron tomadas en un tamaño de 1000X y 2000X para observar los cambios en los granulos de almidón correspondientes al tamaño de partícula de cada harina.



**Fig. 2.15 Microscopia electrónica en un microscopio electrónico de barrido JEOL Modelo JSM-6010LA.**

#### **2.4.5 Análisis de perfil de pastización de las harinas.**

Los perfiles de pasta de harina de nueve muestras suspendidas en agua se analizaron utilizando un reómetro (Anton Paar MCR 102) con una célula de almidón utilizando la metodología propuesta por Rincón-Londoño *et al.*, (2016). Las muestras de harina (3 g) fueron suspendidas en 18 mL de agua. La suspensión fue calentada por 5 min de 50-90 °C. Después, la suspensión se mantuvo a temperatura constante de 90 °C por 5 min, finalmente las muestras fueron enfriadas a 50 °C por 5 min. La velocidad de rotación del sistema fue de 194 rpm.

#### **2.4.6 Reología de las masas de maíz nixtamalizado**

Los cambios reológicos de las masas de maíz fueron evaluados en un equipo TA Instruments Rheometer (RT 20 Haake New Castle, USA) con una placa paralela

rugosa de 35 mm. . La metodología fue apoyada en el trabajo de Valderama-Bravo *et al.*, (2016). Consistió en colocar una pequeña porción de muestra entre las placas del equipo, la geometría que se utilizó fue una placa rugosa de 35 mm, con una separación entre platos de 1mm. Una vez que la muestra fue sometida a un primer esfuerzo se retiró el sobrante de muestra con una espátula y el contorno se cubrió con una pequeña capa de aceite mineral para evitar que la muestra perdiera humedad (ver Fig. 2.16).



**Fig. 2.16 Determinación de viscoelasticidad de masas con un Reometro (RT 20 Haake New Castle, USA).**

Para definir el intervalo de viscoelasticidad lineal, donde el módulo elástico ( $G'$ ) y módulo viscoso ( $G''$ ) es independiente del esfuerzo, se realizaron pruebas de las muestras en un intervalo de 10 a 100 Pa de esfuerzo a 1 Hz de frecuencia, observando que en los valores de esfuerzo no hay cambios en los módulos elástico y viscoso seleccionando un valor de esfuerzo constante para todas las pruebas oscilatorias a una escala de frecuencia de 1 a 10 Hz. De tal forma que los parámetros obtenidos son el módulo de almacenamiento o elástico ( $G'$ ) y el módulo de pérdida o viscoso ( $G''$ ).

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Caracterización del grano

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de las características físicas del grano de maíz.

Tabla 3.1 Caracterización del grano de maíz.

Prueba	Resultado
Humedad del grano (%)	11.2236 ± 0.0098
Índice de flotación (%)	33.33 ± 0.062
Peso hectolítrico (kg/hL)	76 ± 0
Diámetro medio geométrico (mm)	9.3692 ± 0.078
Peso de 100 granos (g)	37.405 ± 0.015

De acuerdo con los parámetros de la caracterización del grano de maíz que se reportan en la Tabla 3.1, se observa que el grano de maíz obtuvo una humedad de 11.2% que se encuentra dentro del intervalo establecido por la norma NMX-FF-034/1-SCFI-2002, que señala una humedad máxima del 14% para el manejo, conservación y almacenamiento del maíz. Esta norma también considera que el grano deberá tener una densidad (también llamado peso hectolítrico) mínima de 74 kg/hL, el maíz utilizado obtuvo una densidad promedio de 76 kg/hL.

Respecto al peso de 100 granos se obtuvo un resultado de 37.405 g, que se encuentra dentro de los valores indicados por Salinas y Vázquez (2006) el cual señala que para granos medianos el peso deberá ser 33-38 g. Se sabe que el peso de 100 granos es un indicador del tamaño y la densidad, características importantes dentro de la industria de harina nixtamalizada, que requiere granos de tamaño intermedio o grande, ya que contienen mayor proporción de endospermo que los pequeños de modo que hay mayor rendimiento en la harina (Mauricio, *et al.*, 2004).

En cuanto al índice de flotación, método indirecto que evalúa la dureza del grano, presentó un 33.33%, encontrándose dentro de los límites que marca la norma que va de 13-37%, considerando como grano duro el maíz empleado. Tomando en cuenta los datos obtenidos, se determinó el tiempo de cocción (40 minutos) que establece la norma para el proceso de nixtamalización.

## 3.2 Caracterización de harinas

### 3.2.1 Índice de Absorción de Agua (IAA) e Índice de Solubilidad en Agua (ISA)

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran los resultados obtenidos de IAA e ISA para los 9 tratamientos de harina de maíz.

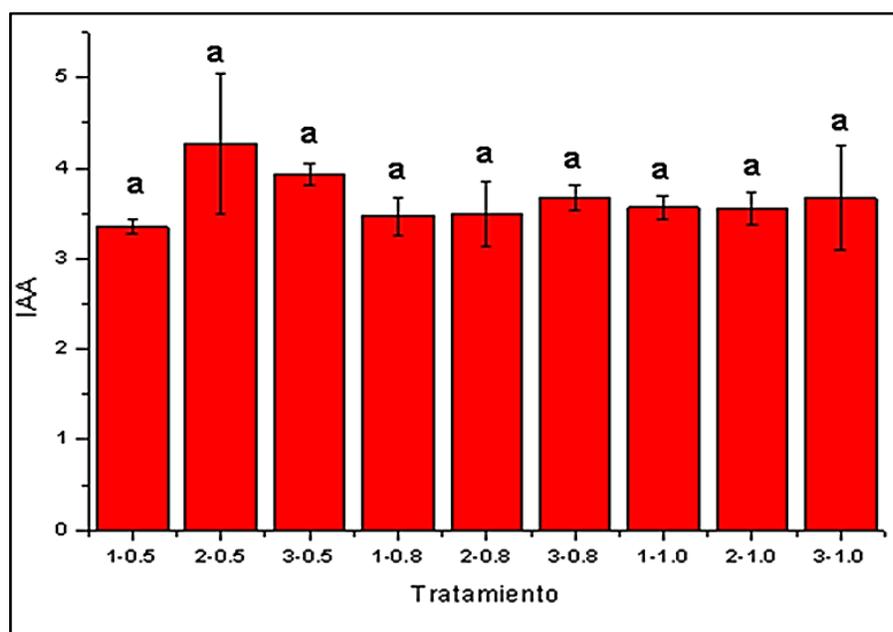
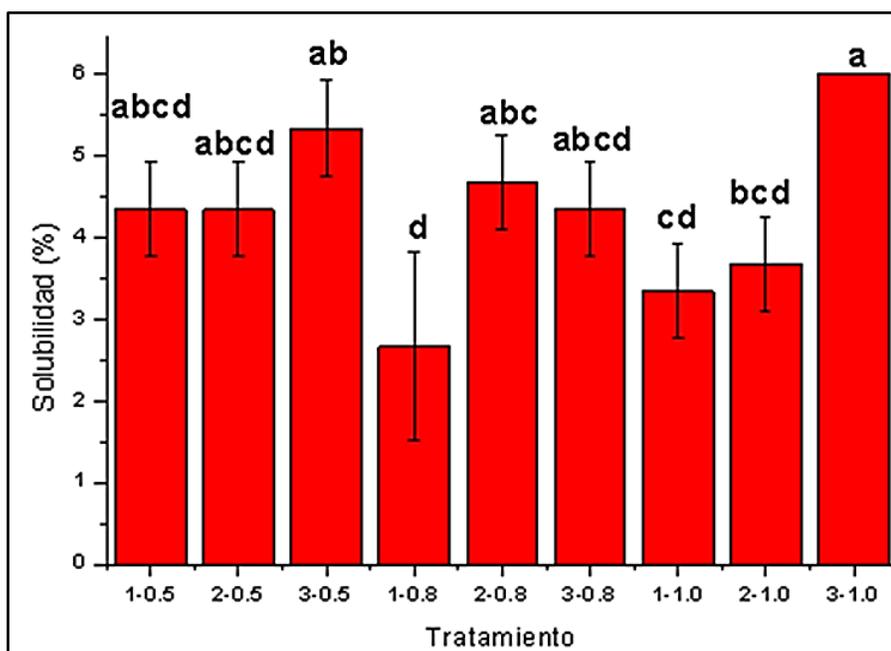


Fig. 3.1 Resultados de IAA. Medias con letras iguales no tienen diferencia significativa.

En la figura 3.1, se muestra el índice de absorción de agua para los 9 tratamientos de harina maíz. De acuerdo con los valores de la literatura reportados para harinas nixtamalizadas comerciales el IAA reportado es 4.20 a 4.40 (Bedolla y Rooney 1984). Algunos investigadores han indicado que la estructura responsable de la capacidad de absorción de agua son los gránulos de almidón y la presencia del pericarpio. Este índice está muy asociado a la suavidad, dureza o sequedad de la tortilla.

Los resultados de índice de absorción de agua (IAA) que están directamente relacionada con el tamaño de partícula y el grado de gelatinización del almidón para los 9 tratamientos vario entre un 3.35 a 4.27., aunque son algo menores que los valores para harinas reportadas en la literatura, esta diferencia se puede atribuir a que las harinas comerciales poseen gomas adicionales en su composición tales como hidrocoloides, goma xantana, entre otras, las cuales dan lugar a una mayor capacidad de retención de agua.



**Fig. 3.2 Resultados de ISA. Medias con letras iguales no tienen diferencia significativa.**

La figura 3.2, índice de solubilidad en agua (ISA), se incrementa debido a la molienda húmeda y la hidrólisis alcalina en las harinas nixtamalizadas por el proceso tradicional. De acuerdo con los datos de la gráfica el valor más grande para ISA se encuentra alrededor del 6% utilizando condiciones de proceso con 1 mm en criba y 3 moliendas húmedas (3M-1), el más bajo se ubica con un valor de 2.5 % para una molienda húmeda y 0.8 mm de tamaño de criba (1M-0.8), para tratamientos donde se utilizó criba de 0.5 mm los valores de ISA se localizan a partir del 4.3 % al 5.3 %, respecto al análisis de este grafico se puede decir que las condiciones de molienda

afectan significativamente al índice de solubilidad en agua, al aumentar el número moliendas húmedas que se realicen al nixtamal, aumentara el valor en ISA.

La solubilidad y la absorción de agua son parámetros que muestran la magnitud de la interacción entre las cadenas de almidón dentro de las secciones amorfas y cristalinas. Se observó que el índice de solubilidad en agua de la harina de maíz aumenta con la disminución del tamaño de partícula de la harina. Las condiciones utilizadas para los 9 tratamientos no afectan significativamente en el IAA, respecto a ISA el efecto es notable y por lo tanto si afecta significativamente a las 9 muestras analizadas.

### 3.2.2 Amilosa y amilopectina

La figura 3.3 y 3.4 se muestran los valores del porcentaje de amilosa y amilopectina obtenidos para cada tratamiento de harina de maíz, con diferente tamaño de criba y molienda húmeda.

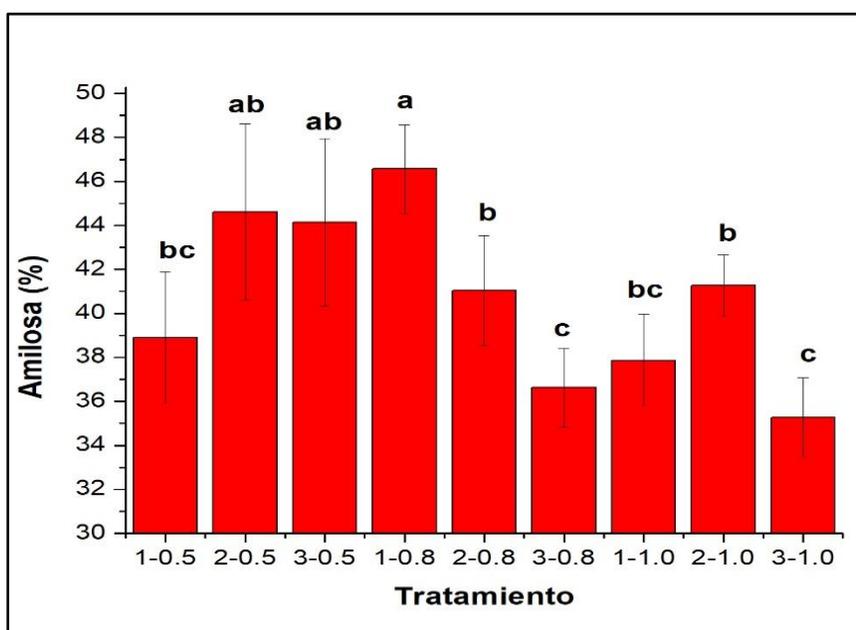
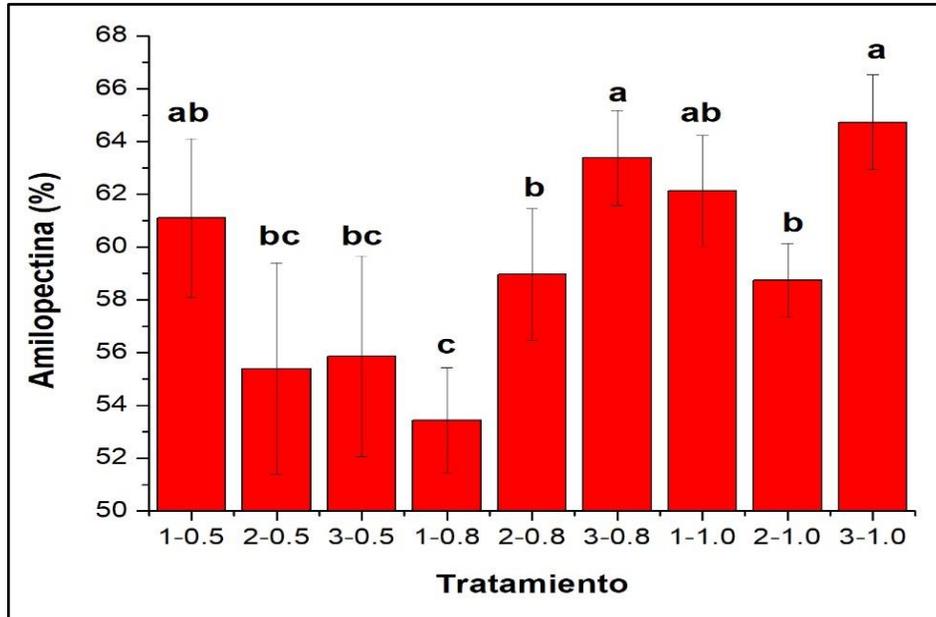


Fig. 3.3 Resultados de % de amilosa. Medias con letras iguales no tienen diferencia significativa.



**Fig. 3.4 Resultados % de amilopeptina. Medias con letras iguales no tienen diferencia significativa.**

De acuerdo a la figura 3.3 se observa que el tratamiento 3M-1.0 es la harina que contiene el menor porcentaje de amilosa (35.2%), esto se ve reflejado en el tamaño del granulo de almidón, ya que de acuerdo a la literatura gránulos <12 µm poseen bajos contenidos de amilosa, pero mayores contenidos de complejos amilosa-lípido. Posteriormente en el tratamiento 1M-0.8 (1 molienda húmeda y 0.8 mm en tamaño de criba) contiene el mayor porcentaje de amilosa (46.5%), seguido del tratamiento 2M-0.5 (44.6%) y 3M-0.5 (44.1%).

En la figura 3.4, se muestra el porcentaje de amilopeptina, componente más abundante en el almidón, los porcentajes más altos se encuentran por encima del 60%, tales como el tratamiento 3M-1.0 (64.7%) y 3M-0.8 (63.3%)

Los resultados de cada tratamiento presentan ligeras diferencias en los porcentajes, ya que la mayoría radica entre 35 y 45% para amilosa y el 53 a 65% para amilopeptina, aun así, cabe resaltar que para las muestras dónde el maíz se sometió a una molienda húmeda triple, el contenido de amilopeptina fue mayor debido a la fricción que sufre el almidón de maíz en su estructura durante dicho proceso. Al utilizar cribas de diferente tamaño y diferentes tiempos en molienda húmeda las

medias con letras iguales no tienen diferencia significativa para amilosa y amilopectina.

La relación amilosa/amilopectina, imparte características definitivas en las propiedades funcionales de los almidones, dada la aplicación específica que se puede dar de éste en un desarrollo de un producto. Según Tester y Morrison (1990), el hinchamiento de los gránulos de almidón es una propiedad de la amilopectina y la amilosa actúa sólo como diluyente.

### 3.2.3 Morfología de gránulos de almidón

En la Figura 3.5 se presenta el gráfico del tamaño promedio de los gránulos de almidón para los 9 tratamientos de harina de maíz. En la Figura 3.6 se observan los gránulos del almidón de maíz usando diferente tamaño de criba y molienda húmeda. La forma y el tamaño de los gránulos, depende mucho de la fuente botánica de la cual se obtienen. Hablando especialmente de almidón de maíz, depende de la variedad de maíz utilizado (Tester y Karkalas 2002).

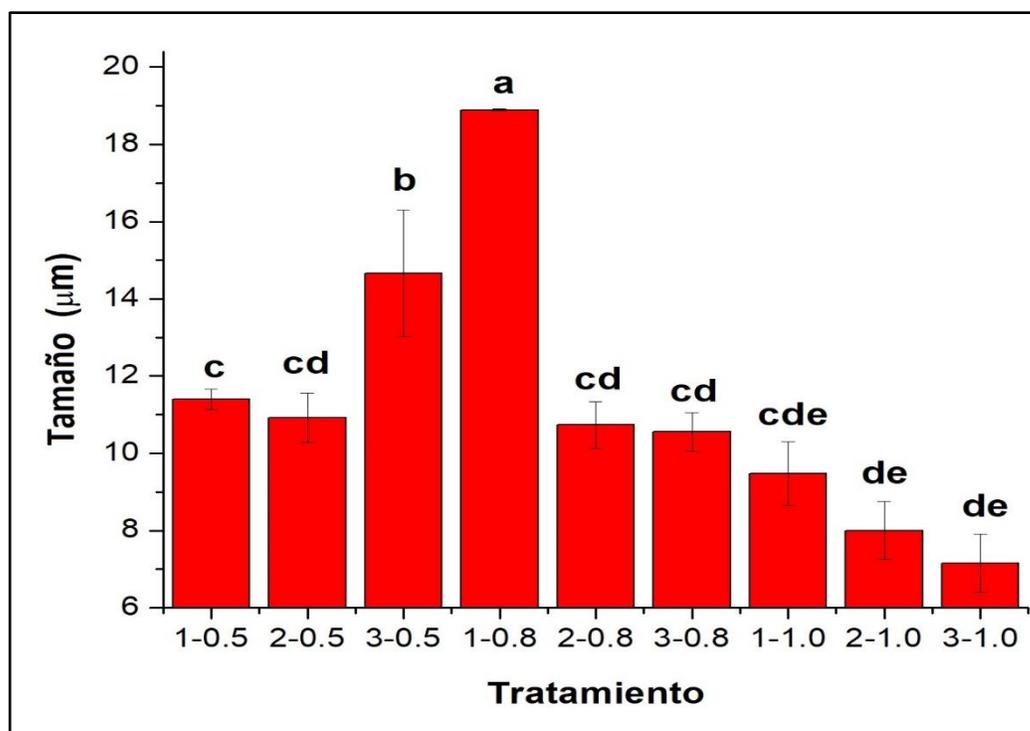


Fig. 3.5 Tamaño del gránulo de almidón de maíz.

Un factor importante que está relacionado con las propiedades funcionales de los productos finales, es estudiar los cambios morfológicos que se llevan a cabo durante el proceso de nixtamalización, especialmente para los gránulos de almidón y sus cúmulos. Para entender los cambios morfológicos que toman lugar durante el uso de diferentes tamaños de criba, y como resultado del proceso de molienda húmeda en los gránulos de almidón, se llevaron a cabo estudios de microscopía electrónica en los 9 tratamientos de harinas de maíz.

Al utilizar la criba de 0.5 mm se obtienen partículas finas que forman gránulos de almidón y estos a su vez generan cúmulos más pequeños resaltando gránulos de tamaño más grandes en su estructura que van de los 11  $\mu\text{m}$  a los 15  $\mu\text{m}$  aproximadamente (ver Figura 3.5), que permiten la entrada de agua de manera rápida en comparación a las cribas de 0.8 mm y 1mm de las cuales se adquieren tamaños de partícula gruesos, que en su mayoría forman cúmulos de mayor tamaño provocando que la absorción de agua sea lenta.

Se han reportado gránulos de almidón de maíz con un tamaño que va de 8 a 20  $\mu\text{m}$  (Blanshard, 1987), almidones de maíz normal y ceroso (waxy) con tamaños de 2 a 30  $\mu\text{m}$  y una forma esférica (Tester *et al.*, 2004). En una muestra de almidón de maíz comercial se encontró un tamaño de gránulo entre 8 y 10  $\mu\text{m}$  usando microscopía electrónica de barrido (Hernandez-Lauzardo, *et al.*, 2004. Como se muestra en la Figura 3.6 y de acuerdo a la Figura 3.5, los gránulos varían en tamaño alrededor de las 6  $\mu\text{m}$  a 18  $\mu\text{m}$ . Se observa que para tratamientos con criba de 1mm, el tamaño promedio del gránulo de almidón disminuye (6 a 9  $\mu\text{m}$ ) para criba de 0.5 mm el tamaño promedio no rebasa los 15  $\mu\text{m}$ , en general se cuenta con almidones de maíz normal (8 a 20  $\mu\text{m}$ ).

La Figura 3-6, 1), muestra la harina de maíz con una molienda húmeda y 0.5 mm en tamaño de criba, no hay gran formación de cúmulos de almidón, pero estos en su mayoría son de mayor tamaño. En la figura 3.6, 3), 5) y 7) donde se utilizaron 3 moliendas húmedas se observaron gránulos de almidón que colapsaron o

fracturaron este efecto pudo provocarse debido a que la fricción del almidón de maíz se expuso más al llevar a cabo el proceso en el molino de discos.

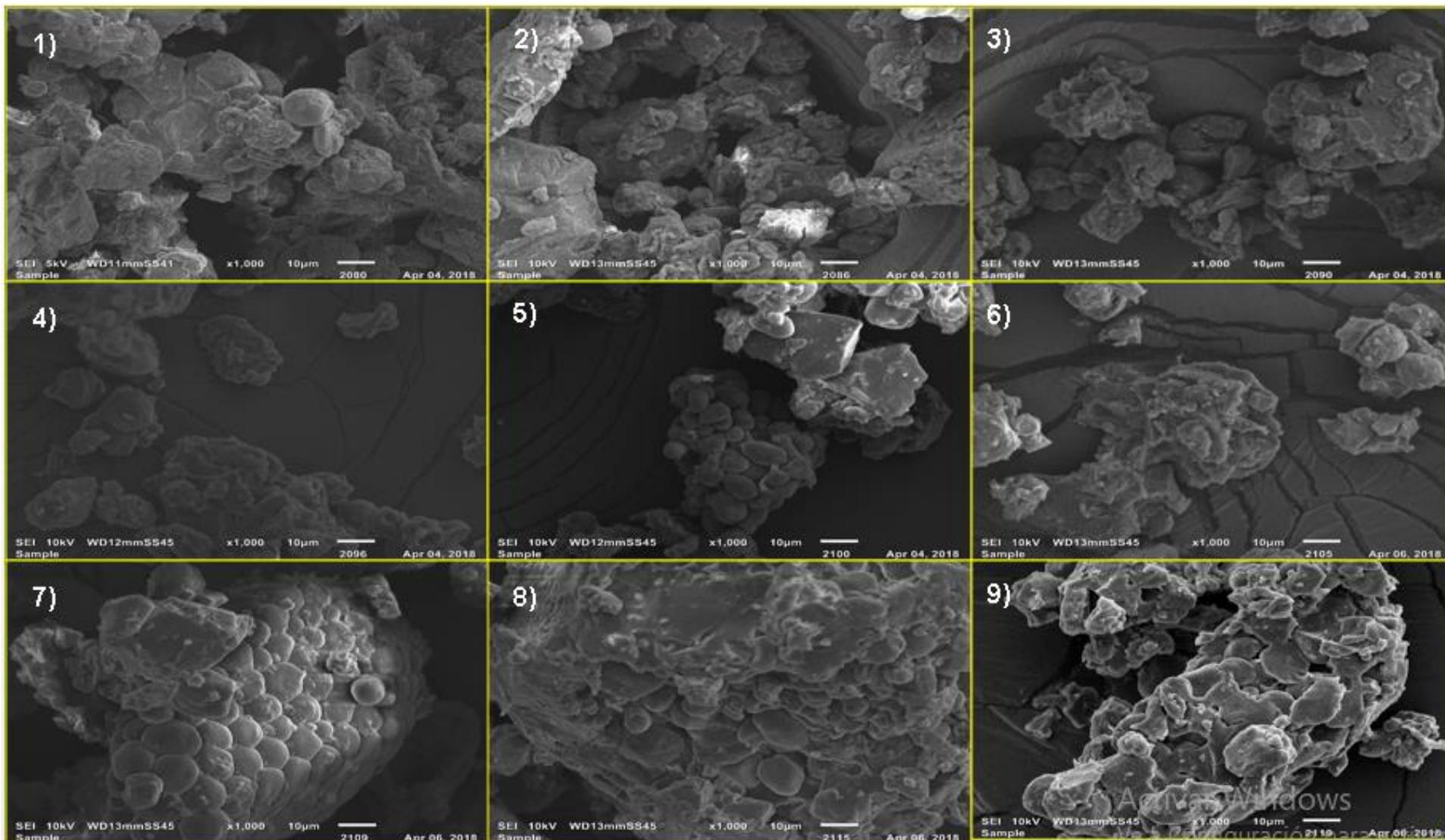
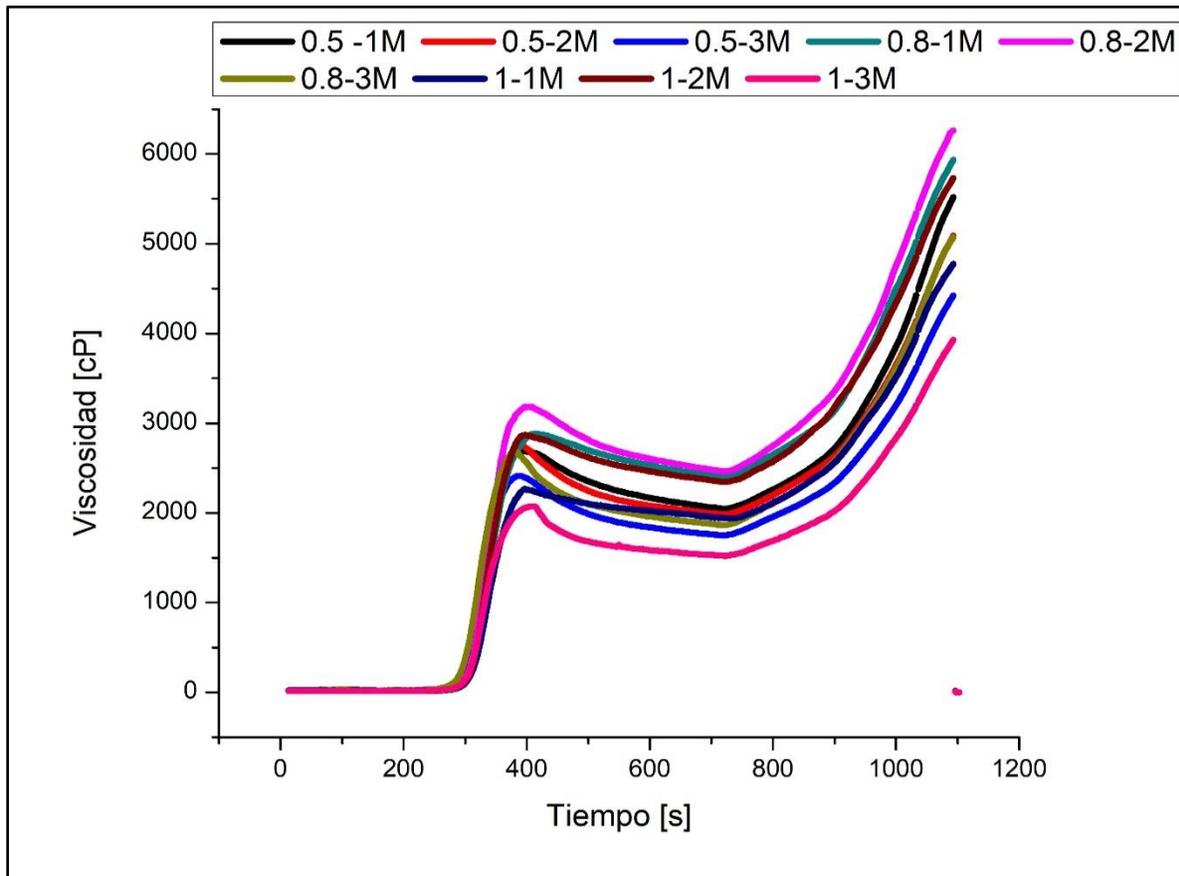


Figura 3.6 Micrografía de almidón de maíz, 1) 1 molienda húmeda y 0.5 mm de tamaño de criba (1M-0.5), 2) 2 moliendas húmedas y 0.5 mm (2M-0.5), 3) 3 moliendas húmedas y 0.5 mm (3M-0.5), 4) 1 molienda húmeda y 0.8 mm (1M-0.8), 5) 2 moliendas húmedas y 0.8 mm (2M-0.8), 6) 3 moliendas húmedas y 0.8 mm (3M-0.8), 7) 1 molienda húmeda y 1.0 mm (1M-1.0), 8) 2 moliendas húmedas y 1.0 mm (2M-1.0) y 9) 3 moliendas húmedas y 1.0 mm (3M-1.0) a una amplitud de 1000x.

### 3.2.4 Perfil de pastización de las harinas

En la figura 3.7 se muestra los resultados de perfil de viscosidad de los tratamientos de harinas de maíz nixtamalizada.



**Fig. 3.7 Perfil de viscosidad 0.5-1M= harina de maíz con criba de 0.5 mm y 1 molienda húmeda, 0.5-2M= harina de maíz con criba de 0.5 mm y 2 moliendas húmedas, 0.5-3M= harina de maíz con criba de 0.5 mm y 3 moliendas húmedas.**

En la Figura 3.7 se puede observar que el tratamiento 1-3M con gránulo de almidón pequeño ( $7 \mu\text{m}$  aproximadamente) presenta la menor viscosidad de todos los tratamientos, cuando se incrementa la temperatura durante la etapa de calentamiento, el almidón que no fue gelatinizado durante el proceso de nixtamalización y molienda húmeda terminó de gelatinizarse en esta etapa, presentando un pico máximo de viscosidad de 2000 cP. En comparación al tratamiento 0.8-2M presenta una mayor viscosidad lo cual significa que en la etapa de calentamiento había mayor cantidad de almidón por gelatinizar y por lo tanto un

mayor porcentaje de amilosa en los gránulos de almidón con medidas en promedio casi a 12  $\mu\text{m}$ . Han *et al.*, (2002) reportaron que el incremento de almidón dañado causado por la molienda disminuye considerablemente los perfiles de viscosidad en almidones cerosos y normales. Es posible que la molienda cause la ruptura significativa de los puentes glucosídicos de las cadenas de amilopectina largas e intermedias que ligan 2,3 y 4 ramas, las cuales pueden causar caída de la viscosidad aparente. Estos sitios de ruptura fueron indicados por Morrison y Tester (1994), es concebible que, con tiempos de molienda largos, pudieron ser rotas proporcionalmente altas cantidades de cadenas cortas.

Este parámetro es importante, pues permite predecir el envejecimiento que pueden tener las tortillas por pérdida de humedad y recristalización de cadenas provenientes del almidón gelatinizado, las cuales forman un gel rígido al enfriarse (Fennema, 2004).

La velocidad de retrogradación del almidón o gelificación está determinada por factores como la proporción de amilopectina/ amilosa, el contenido y la interacción de lípidos con la amilosa, y la longitud de las cadenas de amilosa, entre otros factores, determinados en todos los casos por la fuente botánica del almidón (Salinas-Moreno *et al.*, 2011).

La relación entre la gelatinización del almidón y el tamaño de los cúmulos, aún no está clara, pero teniendo en cuenta la entrada de agua en los cúmulos, es posible tener un cambio a alta temperatura en la gelatinización cuando el tamaño de partícula aumenta, y también la diferencia entre temperatura final y temperatura inicial, para la gelatinización aumenta debido a la demora en la entrada de agua al cúmulo.

La hinchazón es un proceso de difusión de agua que tiene lugar desde las capas externas a las internas de los gránulos de almidón. Para los cúmulos de almidón más grandes, este proceso tiene lugar en las capas externas de los gránulos de almidón. Este hecho también genera un retraso en la viscosidad máxima.

El pico de viscosidad aumenta en función al tamaño de criba, además las partículas más pequeñas desarrollan una viscosidad pico más alta y el tamaño de partículas más gruesas tiene una viscosidad pico más baja. Al utilizar la criba de 0.5 y 0.8 mm se obtienen partículas más finas en comparación a la criba 1mm (ver Figura 3.5) provocando así la facilidad que tiene el agua para entrar en el gránulo y por ende la viscosidad máxima es mayor y en menor tiempo. Como se muestra en el tratamiento 0.8-1M con pico máximo de viscosidad alrededor de 2800 cP así como el tratamiento 0.5-2M, 0.5-1M y 0.8-3M con viscosidad máxima de 2600 cP aproximadamente.

### **3.2.5 Reología de las masas**

En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestra el barrido de frecuencia de cada una de los 9 tratamientos y sus características viscoelásticas de la masa: módulo elástico ( $G'$ ) y módulo viscoso ( $G''$ ) como resultado de la aplicación de un esfuerzo en un intervalo de 10 a 100 Pa.

Para todas las masas, se observa que el módulo elástico  $G'$  fue siempre mayor que el módulo viscoso  $G''$ ; dicho comportamiento ha sido reportado por otros autores para masas de maíz (Platt-Lucero *et al.*, 2010; Quintanar *et al.*, 2011), lo cual indica que todas las masas actúan como un sólido. De acuerdo a la literatura este comportamiento es común en los geles de almidón presentes en las masas de maíz.

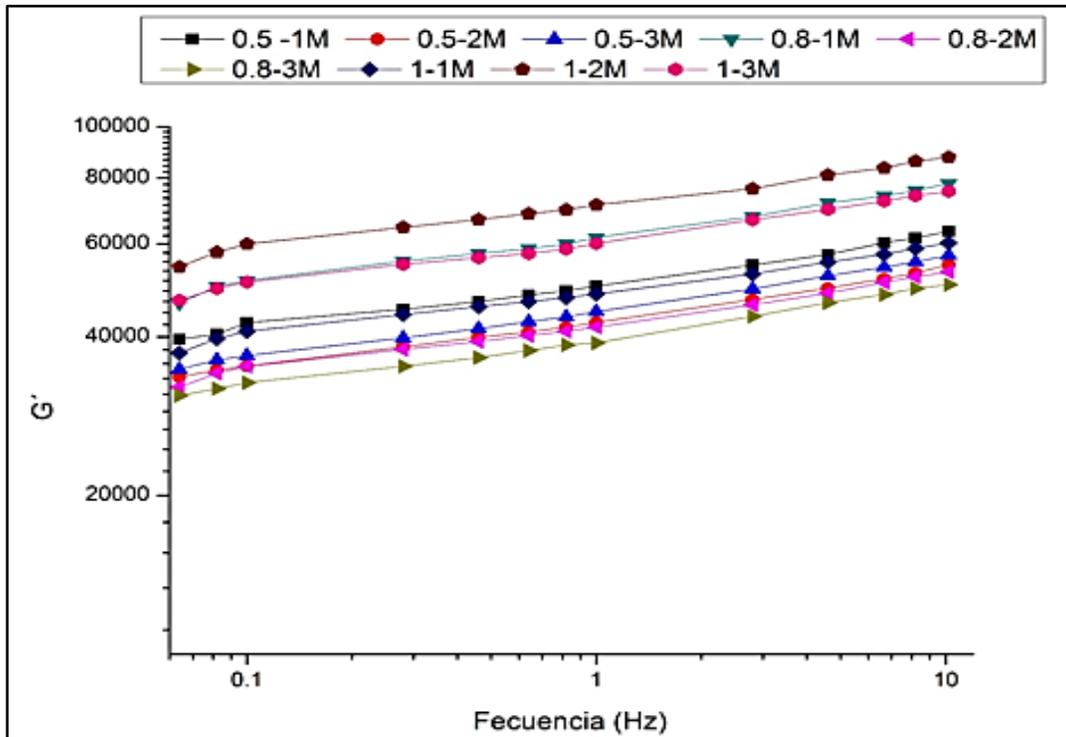


Fig. 3.8 Módulo elástico de masas de maíz nixtamalizado.

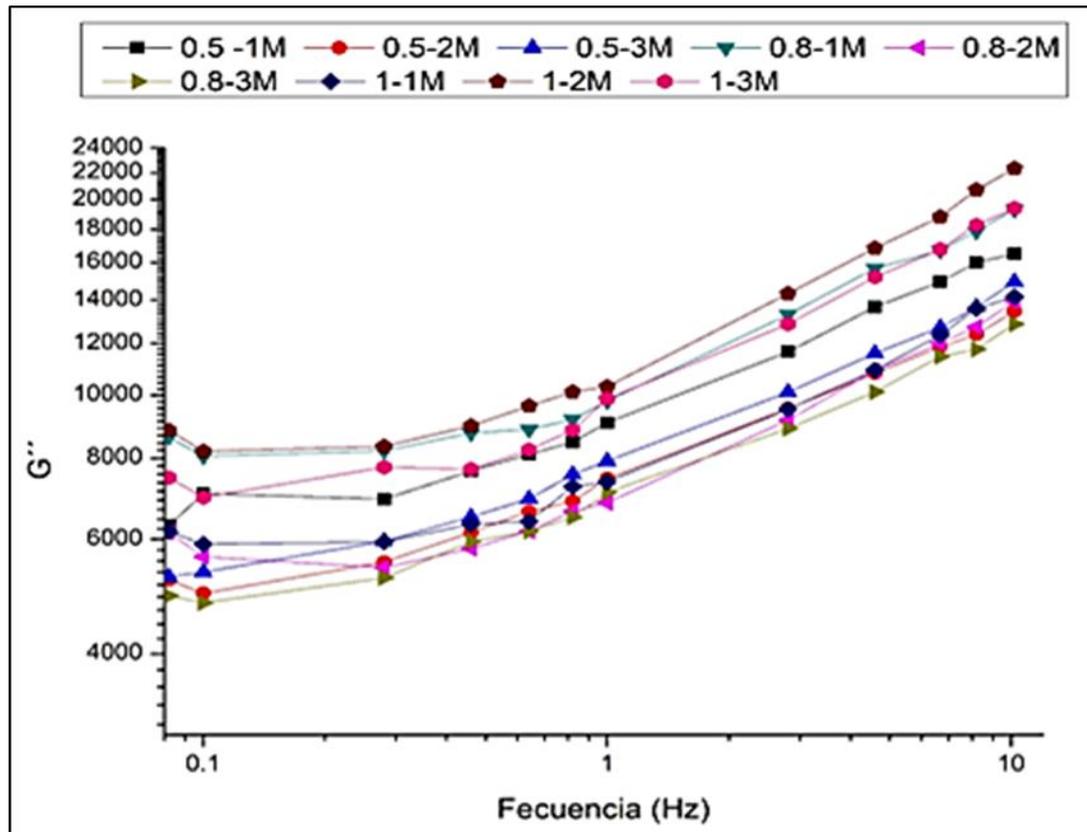


Fig. 3.9 Módulo viscoso de masas de maíz nixtamalizado.

En la figura 3.8 en donde se muestra el módulo elástico se observa que las masas con un comportamiento de un sólido viscoso similar son las correspondientes a 0.5-3M, 0.5-2M, 0.8-2M y 0.8-3M (cribas de 0.5 mm y 0.8; 2 y 3 moliendas húmedas). Las masas 1-3M y 0.8-1M tienen un comportamiento viscoelástico similar, aunque  $G'$  es mayor en estas masas en comparación con 0.5-3M, 0.5-2M, 0.8-2M y 0.8-3M. La masa 1-2M presentó un comportamiento viscoso mayor en comparación de los demás tratamientos, este cambio nos podría indicar que la elasticidad de la masa aumento. Se observa también el módulo de almacenamiento o elástico  $G'$  siempre fue mayor en todas las masas que  $G''$  módulo de pérdida o viscoso, esto significa que en las masas es predominante el módulo elástico, lo cual, de acuerdo a Campos *et al.*, 1997 indican que cuando un valor alto del módulo elástico ( $G'$ ) es predominante en las masas es debido a una fuerza mayor de amasado en la masa y a la composición del almidón (de acuerdo al porcentaje de amilosa y amilopectina) presente en los granos (Hayta y Schofield, 2005; Van Bockstaele *et al.*, 2008), lo cual puede utilizarse para diferenciar la viscoelasticidad de masas (Lee y Mulvaney, 2003).

Con respecto al módulo viscoso (Fig. 3.9), los tratamientos 1-2M, 1-3M y 0.8-1M incrementaron su módulo comparado con los tratamientos 0.5.3M, 1-1M, 0.5-2M y 0.8-2M que se obtuvo un descenso en el valor de  $G''$ . Mientras que la masa 0.8-3M mostro un menor modulo en comparación a las masas 0.5-1M, 1-2M, 1-3M y 0.8-1M.

Al aumentar el valor en a frecuencia (1 a 10 Hz), también incrementan los valores los valores de  $G'$  y  $G''$ , para todas las masas, coincidiendo con otros estudios (Campos *et al.*, 1997; Ramkumar, et al., 1996; Rao 1999). El incremento de los módulos elástico y del módulo viscos, con respecto a la frecuencia en las masas, indica que los componentes del maíz tales como el almidón, fibra, lípidos, proteínas y la interacción del hidróxido de calcio al nixtamalizar presentan cierta fuerza ante la deformación a la que está siendo sujeto.

Mientras que para las 9 masas a cualquier frecuencia el módulo elástico  $G'$  siempre fue mayor que el módulo  $G''$  y de acuerdo a la bibliografía, este comportamiento ( $G' > G''$ ) es característico de los geles de almidón.

## CONCLUSIONES

Las características físicas del grano de maíz son de suma importancia debido a que determinan y establecen el tiempo de cocción de la nixtamalización. Para este estudio dichos parámetros cumplieron con los intervalos establecidos en la norma NMX-FF-034/1-SCFI-2002, provocando un mayor rendimiento al obtener las harinas de maíz.

El índice de absorción de agua no presentó diferencia significativa, es decir que el almidón no mostró daño y por tanto no absorbió cantidades elevadas de agua, obteniendo rendimientos adecuados en las harinas. Sin embargo, para el ISA las condiciones de molienda afectan significativamente al aumento o disminución de este parámetro analizado para las 9 harinas estudiadas, confirmando una vez más que el almidón no sufrió daños en su estructura al implementar diferentes tiempos de molienda y distintos tamaños de criba.

Los contenidos de amilosa y amilopectina variaron al utilizar diferentes condiciones de molienda por lo cual al aumentar el número de moliendas aumentara el porcentaje de amilopectina debido a la fricción del almidón durante el proceso y una mayor viscosidad. Estas características de las harinas definirán para que productos son aptas, ya que para desarrollar tortillas se necesitan de partículas más finas y para botanas partículas más gruesas por mencionar algunos ejemplos ya que hay una gran variedad en el mercado.

El tamaño de granulo afectará significativamente a la absorción de agua como se observa en las micrografías realizadas, al utilizar criba de 1 mm se obtienen tamaños de partícula pequeños (menores a 10  $\mu\text{m}$ ) lo cual ayudara a que la entrada de agua sea más eficiente debido a la formación de cúmulos de almidón pequeños

en comparación con las cribas de 0.5 mm y 0.8 mm. Donde se observó que algunos de los gránulos se fracturaron por exponer mayor tiempo el maíz nixtamalizado al proceso de molienda. La distribución del tamaño de partícula es el criterio más importante cuando se trata de definir el propósito específico de una harina. Por ejemplo, la harina que se destina a la elaboración de tortillas debe tener una proporción mayor de partículas finas que la destinada a la elaboración de tostadas.

El perfil de pastización se asocia con el tamaño del granulo de almidón y contenidos de amilosa y amilopectina puesto que al contar con gránulos de tamaño pequeño la viscosidad será menor en comparación con los gránulos de mayor tamaño la viscosidad es mayor con amilosa en mayor proporción y por tanto más almidón por gelatinizar. Al tener diferentes tamaños de partícula debido al uso de diferentes tamaños de criba el pico de viscosidad aumenta o disminuye para los 9 tratamientos de harinas de maíz

Para todas las masas con diferentes tiempos de molienda y diferente tamaño de criba el módulo  $G'$  fue mayor que  $G''$  lo cual muestra que el carácter elástico predomina sobre el carácter viscoso en las masas, lo que indica un comportamiento más dominante de un alimento semi-sólido.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ Asturias, M.A. (2004). Maíz de alimento sagrado a negocio del hambre. *Acción ecológica*. Quito Ecuador 1, 9-12.
- ❖ Atwell, W.A., Hood, L.F. Lineback, D.R., Varrianomarston, E., Zobel, H,F, (1988). The terminology and methodology associated with basic starch phenomena, *Cereal Foods World* 33, 306-311.
- ❖ Ayala-Rodríguez A. E., Gutiérrez-Dorado R., Milán-Carrillo J., Mora-Rochin S., López-Valenzuela J., Valdez –Ortiz A., Paredes-López O., Reyes – Moreno, C. (2009). Nixtamalised flour and tortillas from transgenic maize (*Zea mays L.*) expressing amarantin: Technological and nutritional properties. *Food Chemistry* 214, 50-56.
- ❖ Bedolla, S., Rooney, L.W. (1984). Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. *Cereals Food World* 29 (11), 732-735.
- ❖ Be-Miller, J.N., Hubert, K., C. (2007). Carbohydrates In: Fennema's Food Chemistry Srinivasan, D., Parkin, K.m Owen, R. ed. Taylor & Francis. Inc. Chapter 3, pp: 120-131.
- ❖ Biliaderis, C.G., (1991). The structure and interactions of starch with food constituents. *Can. Journal of Physiology and Pharmacology* 69,70-78.
- ❖ Biliaderis, C.G. (1998). Structures and phase transitions of starch polymers. In: Walter RH editor. *Polysaccharide Association Structures in Foods*. New York: Marcel Dekker. 57-168 p.
- ❖ Blanshard, J.M.V. (1987). Starch granule structure and function: a physicochemical approach. In: Galliard T editor. *Starch: Properties and Potential*. Wiley, Chichester. 6-54 p.
- ❖ Borwankar, R.P., Frye, L.A., Blaurock., A.E., Sasevich, F.J. (1992). Rheological characterization of melting of margarines and tablespreads. *Journal of Food Engineering* 16, 55-74.

- ❖ Campos, D.T., Steffe, J.F., Ng, P.K.W. (1997). Rheological behavior of undeveloped and developed wheat dough. *Cereal Chemistry* 74, 489-494.
- ❖ Casas, A., Ramírez, O. (1998). Evaluación de la textura de materiales con maquina universal de deformación. Curso de superación académica. Departamento de Ingeniería y Tecnología. Sección LEM. Alimentos. UNAM.
- ❖ Choi, S.G., Kerr, W.L. (2004). Swelling characteristics of native and chemically modified wheat starches as a function of heating temperatura and time. *Starch/Starke* 56, 181-189.
- ❖ Contreras-Jiménez, B.L. (2009). Caracterización de harina de maíz instantánea obtenida por calentamiento óhmico. Tesis de maestría en tecnología avanzada. Instituto Politécnico Nacional, CICATA. 23-26 pp.
- ❖ Contreras-Jiménez, B.L. (2015). Efecto del tiempo de acondicionamiento sobre las propiedades reológicas de masa de maíz nixtamalizada obtenida por extrusión. Tesis de doctorado en tecnología avanzada. Instituto Politécnico Nacional. CICATA. 90-101 pp.
- ❖ Cornejo-Villegas, M.A., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Real-López, A., Zambrano-Zaragoza, M.L., Martínez-Vega, V., Rodríguez-García, M.E. (2013). Physicochemical, morphological, and pasting properties of nixtamalized flours from quality protein maize and its particle distribution. *LWT - Food Science and Technology* 53,81-87.
- ❖ Cortéz, A., Altamirano, W. (1972). Mejoramiento nutricional del maíz. INCAP, L-3, 90-106pp.
- ❖ Díaz-Manrique, A. (2017). Maíz, parte de la vida de Tlaxcala desde la época prehispánica. <https://bajopalabra.com.mx/maiz-parte-de-la-vida-de-tlaxcala-desde-la-epoca-prehispanica>. Fecha de consulta 25 de Marzo 2020.
- ❖ FAO. (2001). Composición química y valor nutritivo del maíz. <http://www.fao.org/docrep/t0395s/t0395s03.htm>. Fecha de consulta 25 de Marzo 2020.

- ❖ FAO (1993). El maíz en la nutrición humana. Departamento de agricultura. <http://www.fao.org/docrep/t0395s/00.htm>. Fecha de consulta 25 de Marzo 2020.
- ❖ Fennema, O., (2004). Química de los alimentos, 3ra Edición. Edit. Marcel Dekker, New York, Basel. Ab.
- ❖ Ferry, J. (1980). Viscoelastic properties of polymers. 3ra ed. John Wiley and Sons Eds. Nueva York, EEUU.
- ❖ FIRA, (2019). Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. Fideicomisos Instituidos en relación con la agricultura. pp 15-20.
- ❖ Galicia, L., Miranda, A., Gutiérrez, M.G., Custodio, O., Rosales, A., Ruíz, N., Surlés R., Palacios, N. (2012). Laboratorio de calidad nutricional de maíz y análisis de tejido vegetal. CIMMYT.
- ❖ García, S., (2004). Estudio nutricional comparativo y evaluación biológica de tortillas de maíz elaboradas por diferentes métodos de procesamiento. Tesis de maestría. CICATTA, Querétaro.
- ❖ García-Rejón, A. (1981). Introducción a la reología de los polímeros. *Plastinoticias* septiembre, 37-54.
- ❖ Geankoplis, C.J. (2005). Procesos de Transporte y operaciones unitarias, 3ª ed. CECSA, México, pp 928-933.
- ❖ Gomez, M.H., Waniska, R.D., Rooney, L.W. (1990). Effects of nixtamalization and grinding conditions on the starch masa. *Starch* 69 (3), 275-279.
- ❖ Gomez, M.H., Waniska, R.D., Rooney, L.W. (1991). Starch characterization of nixtamalized maize flour. *Cereal Chemistry* 68 (6), 578-582.
- ❖ Gomez M.H., Waniska R.D., y Rooney and Pflugfelder, R.L. (1987). Dry corn masa flours for tortilla and snack production. *Cereal Foods World*. 32:372.
- ❖ Goodwin, J., Hughes, R. (2000). Rheology for Chemists: An Introduction Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK.

- ❖ Gunasekaran, S., Ak, M. M. (2000). Dynamic oscillatory shear testing of foods-selected applications. *En Trends in Food Science & Technology* 11, 115-127.
- ❖ Han, X.Z., Campanella, O.H., Nadege, C.M., Hamaker B.R. (2002). Consequence of Starch Damage on Rheological Properties of Maize Starch Pastes. *Cereal Chemistry* 79(6), 897-901.
- ❖ Hayta, M., Schofield, J. (2005). Dynamic rheological behavior of wheat glutes during heating. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85(12):1992 – 1998.
- ❖ Henry, A.G., Hudsonb, H.F., Piperno, D.R. (2009) Changes in starch grain morphologies from cooking. *Journal of Archaeological Science* 36, 915-922.
- ❖ Hernández-Lauzardo, A.N., Mendez- Montealvo, M.G., Velázquez del Valle, M.G., Solorza-Feria, J., Bello-Perez, L.A. (2004). Isolation and partial characterization of Mexican Oxalis tuberosa starch. *Starch/Starke* 56, 357-363.
- ❖ International Starch Institute. (1999). <http://www.internationalstarchinstitute.com>. Fecha de consulta 26 Marzo 2020.
- ❖ Knutzon, C.A., Grove, M.J. (1994). Rapid method for estimation of amylose in maize starches. *Cereal Chemistry* 71, 469.
- ❖ Kong, X., Zhu, P., Sui, Z., Bao, J. (2015) Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations. *Food Chemistry* 172, 433-440.
- ❖ Lee, C.C., Mulvaney, S.J. (2003). Dynamic Viscoelastic and Tensile Properties of Gluten and Glutenin Gels of Common Wheats of Different Strength. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 51 (8), 2317-2327.
- ❖ Leewatchararongjaroen, J., Anuntagool, J., (2016). Effects of dry- milling and wet-milling on chemical, physical and gelatinization properties of rice flour, *Rice Science* 23 (5), 274-281.

- ❖ Li, J. Y., Yeh, A.I. (2001). Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches, *Journal Food Engineering* 50, 141-148.
- ❖ Martínez-Flores, H.E., Garnica, M.G., Romero, V.J.U., Yahuaca, J.B. (2006). Evaluating the quality of during alkaline cooking of corn. *Journal Food Lipids* 13, 178-180.
- ❖ Mauricio, R.A., Figueroa, J.D., Taba, S., Reyes, M.L., Rincón, F., Mendoza, A. (2004). Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27, 213-222.
- ❖ Méndez-Montalvo, G., García-Suárez, F.J., Paredes-López, O., Bello-Pérez., L.A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal Cereal Science* 48, 420-425.
- ❖ Mira, I., Persson, K., Villwock, V.K. (2007). On the effect of surface active agents and their structure on the temperature-induced changes of normal and waxy wheat starch in aqueous suspension. Part I. Pasting and calorimetric studies. *Carbohydrate Polymers* 68 (4), 665-678.
- ❖ Montemayor, E., Rubio, M. (1983). Alkaline cooked corn flour: technology and uses in tortilla and snack products. *Cereal Foods World* 28, 571-577.
- ❖ Morris, M.J. (1990). Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science and Technology* 1, 2-6.
- ❖ Morrison, W.R., Tester, R.F., Gidley M.J. (1994). *Journal Cereal Science* 19, 209-217.
- ❖ Mua, J.P., Jackson D.S. (1997). Fine structure of corn amylose and amylopectin fractions various molecular weights. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 45, 3840-3847.
- ❖ Narváez-González, E.D., Figueroa-Cárdenas, J. D., Taba, S., Castaño-Tostado, E., Martínez- Peniche R.A. (2007). Efecto del tamaño del gránulo de almidón de maíz en sus propiedades térmicas y de pastificado. *Fitotecnia* 30 (3), 269 – 277.
- ❖ NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios del maíz. Norma Mexicana. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.

- ❖ NMX-F-046-S-1980. Harina de maíz nixtamalizado. Norma Mexicana. Dirección General De Normas.
- ❖ Paredes-López, O., Guevara Lara F., Bello Pérez L.A. (2009). La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Revista Ciencias*, 62-65.
- ❖ Platt-Lucero, L.C., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P.I., López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D.I., Reyes-Moreno, C., Milan-Carrillo, J. , Morales-Rosas, I. (2010) Improving textural characteristics of tortillas by adding gums during extrusion to obtain nixtamalized corn flour. *Journal for food oral processing research*. 41, 736-755.
- ❖ Pomeranz, Y. (1991). Carbohydrates: starch En “Functional Properties of food Components”, Academic Press. New York, pp 24-78.
- ❖ Quintanar-Guzman A., Jaramillo-Flores, M.E., Mora-Escobedo, R., Chandel-Guerrero, L., Solorza-Feria, J., (2009). Changes on the structure, consistency, physicochemical and viscoelastic properties of corn (*Zea mays* sp.) under different nixtamalization conditions. *Carbohydrate Polymers* 78, 908-916.
- ❖ Ramkumar, D.H.S., Bhattacharya, M., Menjivar J.A., Huang, T.A. (1996). Relaxation behavior and the application of integral constitutive equations to wheat dough. *Journal texture studies* 27 (5), 517-544.
- ❖ Rao, M.A. (1999). Rheology of fluid and semisolid foods principles and applications. Editorial Acribia (España). pp. 132-134, 201-203.
- ❖ Rao, V.G., Rao, H.P. (1993). Methods for determining rheological characteristics of doughs: A critical evaluation. *Journal of Food Science* 30 (2), 77-87.
- ❖ Rincón-Londoño, N., Millan-Malo, B., Rodríguez-García, M. (2016). Analysis of thermal pasting profile in corn starch rich in amylose and amylopectin: Physicochemical transformations, Part II. *International Journal of Biological Macromolecules* 89, 43-53.

- ❖ Rodríguez-Sandoval. E., Fernández-Quintero, A. (2005). Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz. *Revista Ingeniería e Investigación* (25), 72-78.
- ❖ Rooney, L.W., Huang, D.P. (2001) Starches for snack foods. In. Lusas EW y Rooney LW editors. *Snack foods processing*. Pennsylvania: Technomic Publishing Company. 115-130 pp.
- ❖ Rooney, L. W., Suhendro, E.L., (1999). Perspectives on nixtamalization (alkaline cooking) of maize for tortillas and snacks. *Cereal Foods World* 44: 466-470.
- ❖ Sahai, D., Buendía, M.O., Jackson, D.S. (2001). Analytical technique for understanding nixtamalized maize flour particles size distribution and functionality relationships in masa flour simple. *Cereal Chemistry* 78 (1), 14-18.
- ❖ Sahai, D., Jackson, D.S. (2001). A novel enzymatic nixtamalization process for producing corn masa flour. *Cereal Foods World* 45, 240-245.
- ❖ Salinas-Moreno, Y., Castillo-Linares, E.B., Vázquez-Carrillo, M.G., Buendía-González, M.O. (2011). Mezclas de maíz normal con maíz ceroso y su efecto en la calidad de tortilla. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 2 (5), 689-702.
- ❖ Salinas, M.Y., Vázquez, C.G. (2006). Metodologías de análisis de calidad nixtamalera-tortillera en maíz. INIFAP. Ciudad de México, México. Folleto Técnico No. 23. 91 p.
- ❖ Salinas-Moreno, Y., Soto, M.H., Martínez-Bustos, F., Ortega, R.P., Arellano-Vázquez, J.L. (2003). Effect of alkaline cooking process on anthocyanins in pigmented maize grain. *Agrociencia* 37, 617-628.
- ❖ Sánchez-Armas, A. (1996). La tecnología en la industria de la masa y la tortilla. *In: La Industria de la Masa y la Tortilla*. Torres F., E. Moreno, I. Chong, y J. Quintanilla (eds.). UNAM-PUAL. pp. 163-166.

- ❖ Sánchez-González, I. (2007). Propiedades fisicoquímicas de amidones catiónicos elaborados por extrusión. Tesis de maestría. CICATA. IPN. México.
- ❖ SIAP-SADER. 2019. Expectativas agroalimentarias.
- ❖ Steffe, J.F. (1992). *Rheological Methods in the Food Process Engineering*. Freeman Press: East Lancing. UK.
- ❖ Sullivan, C. R., Corona A., Rolling, J. E. (1992). Chromatographic technologies for macromolecular starch characterization. In *Developments in Carbohydrate Chemistry*, ISBN 0-913250-76-7. American Association of Cereal Chemists (AACC), St. Paul, USA, 193-238.
- ❖ Tadros, T.F. (2010). *Rheology of dispersions. Principles and applications*. Wiley-Vch. pp. 37-42.
- ❖ Tanner, R.I. (1985). *Engineering Rheology*. E.U.A. Oxford University Press.
- ❖ Tang, H., Watanabe, K., Mitsunaga, T. (2002). Characterization of storage starches from quinoa, barley and adzuki sedes. *Carbohydrate Polymers* 49, 13-22.
- ❖ Tester, R.F., Karkalas, I., Qi, X. (2004). Starch- composition, fine structure and architecture. *Journal Cereal Science* 39, 151-165.
- ❖ Tester, R.F., Karkalas, J. (2002). Starch. IN: Steinbuchel, A. (Series Ed.9 Vandamme, E.J., De Baets, S., Steinbuchel, A. (vol. Eds.), *Biopolymers*, vol 6. Polysaccharides. II. Polyseaccharides from Eukaryotes, Wiley-VCH, Weinheim. 381-438 pp.
- ❖ Tester R F, W R Morrison (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose and lipids. *Cereal Chemistry* 67, 551-557.
- ❖ Tetlow, I.J., Morell, M.K., Emes, M.J. (2004). Recent developments in understanding the regulation of starch metabolism in higher plants. *Journal of Experimental Botany* 55, 2131-2145.
- ❖ Valderrama-Bravo, C., Pacheco-Domínguez, A., Hernández-Aguilar, C., Flores-Saldaña, N., Villagran-Ortíz, P., Perez-Reyes, C., Sánchez-

- Hernández, G., Oaxaca-Luna, A. (2016). Effect of nixtamalized maize with lime water (nejayote) on rheological and microbiological properties of masa. *Journal of Food Processing and Preservation* 41, 1-9.
- ❖ Van-Bockstaele, F., De Leyn, I., Eeckhout, M., Dewettinck, K. (2008). Rheological Properties of Wheat Flour Dough and the Relationship with Bread Volume. I. Creep-Recovery Measurements. *Cereal Chemistry* 85, 753-761.
  - ❖ Vega, L.J., Rojas, I., Gutiérrez, E., Rincón, N., Acosta, A.A., Del Real, A., Rodríguez, M.E. (2017). Physicochemical properties of nixtamalized corn flours with and without germ. *Food Chemistry* 220, 490-497.
  - ❖ Véles-Medina, J.J. (2004). Caracterización de tostadas elaboradas con maíces pigmentados y diferentes métodos de nixtamalización. Tesis de maestría. CICATA.IPN. Querétaro.
  - ❖ Vilche, C., Gely, M.C., Santalla, E. (2003). Physical properties of quinoa seeds. *Biosystems Engineering*, 86, 59-65.
  - ❖ Watson, S.A. (1987). Structure and composition. En S.A. Watson y P.E. Ramstad. Eds. *Corn: chemistry and technology*, p. 53-82. St Paul, EE. UU., Am. Assoc. *Cereal Chemistry*.
  - ❖ Weber, U., Langlois, D., (2010). The effect of grinding media performance on milling and operational behavior. *Journal South African Institute of Mining and Metallurgy* 110, 147-152.
  - ❖ Wurzburg, O.B. (1986). Introduction. Chapter 1. In *Modified Starches: Properties and Uses*. (Ed. O. B. Wurzburg). *CRC Presss, Inc.* Boca Raton. Florida U.S.A. pp. 3-16.
  - ❖ Zhang, L.M. (2001). A Review of starches and their derivatives for oilfield application in China. *Starch/Starke* 53, 401-407.