



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, TEXTURALES
Y REOLÓGICAS DE MASAS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO CON AGUA Y
SÓLIDOS SUSPENDIDOS DE NEJAYOTE**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

YAZMÍN YAEL LÓPEZ RAMÍREZ

ASESORES:

**DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO
DR. SERGIO JIMÉNEZ AMBRIZ
I.A. PATRICIA MUÑOZ AGUILAR**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **TESIS**

Evaluación de las propiedades fisicoquímicas, texturales y reológicas de masas de maíz nixtamalizado con agua y sólidos suspendidos de nejayote-

Que presenta la pasante: Yazmín Yael López Rampirez
Con número de cuenta: 304535378 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 HABLARA EL ESPÍRITU”
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 02 de abril de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

| | NOMBRE | FIRMA |
|---------------------|--|--------------|
| PRESIDENTE | Dra. Elsa Gutiérrez Cortez | |
| VOCAL | Dra. María del Carmen Valderrama Bravo | |
| SECRETARIO | IA. Miriam Edith Fuentes Romero | |
| 1er SUPLENTE | Dra. María Guadalupe Sosa Herrera | |
| 2do SUPLENTE | IA. Frida Rosalía Cornejo García | |

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).
HHA/pm

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A mis padres, Rita Ramírez González y Marco Antonio López Torres por el apoyo incondicional a lo largo de toda la licenciatura.

A mis abuelos Teresa González y Juventino Ramírez, mis tíos Jorge, Rocío, Ricardo, Miriam, mis primos Luis, Miguel Ángel, Ricardo, Víctor y mis demás familiares y amigos que forman parte importante de mi vida.

A la Doctora María del Carmen Valderrama Bravo, por su gran apoyo incondicional, paciencia y motivación para la terminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis; al Doctor Sergio Jiménez Ambriz, por su tiempo, apoyo y valiosas opiniones; a la Ing. Patricia Muñoz Aguilar por su colaboración en este trabajo.

A la Ing. Miriam Edith Fuentes Romero por el apoyo en el análisis y medición de parámetros reológicos y de textura.

A la M. en C. Alicia del Real López por la toma e interpretación del análisis de microscopía electrónica de barrido, al QFB Chiu Chan Juan por su apoyo en los análisis químicos.

“Grande es el arte de comenzar, pero mayor es el arte de concluir”

Henry Longfellow Wadsworth

“Por mi raza hablará el espíritu”

José Vasconcelos

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio Experimental Multidisciplinario I y Unidad de Investigación de Granos y Semillas de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM con apoyo del proyecto PAPIIME No.PE204011.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE FIGURAS | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | v |
| RESUMEN | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 2 |
| 1. ANTECEDENTES | 4 |
| 1.1 Generalidades del maíz | 4 |
| 1.1.1 Definición | 4 |
| 1.1.2 Estructura del grano | 4 |
| 1.1.3 Composición química del grano | 6 |
| 1.1.4 Calidad del grano de maíz | 8 |
| 1.2 Nixtamalización | 9 |
| 1.3 El Nejayote | 13 |
| 1.4 Calidad de la masa de maíz nixtamalizada | 16 |
| 1.5 Propiedades químicas de la masa del maíz | 17 |
| 1.6 Textura | 18 |
| 1.6.1 Propiedades texturales de la masa de maíz | 20 |
| 1.7 Viscoelasticidad | 21 |
| 1.7.1 Propiedades viscoelásticas de la masa de maíz | 27 |
| 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 29 |
| 2.1 Objetivos | 29 |
| Objetivo general | 29 |
| Objetivos particulares | 29 |
| 2.2 Cuadro metodológico | 29 |
| 2.3 Caracterización de la materia prima | 31 |
| 2.3.1 Humedad del grano | 32 |
| 2.3.2 Peso hectolítrico (densidad aparente) | 33 |
| 2.3.3 Dureza (método indirecto mediante el índice de flotación) | 33 |
| 2.3.4 Porcentaje de las estructuras del grano de maíz | 34 |
| 2.4 Nixtamalización | 34 |

| | |
|---|----|
| 2.5.1 Obtención de sólidos de nejayote | 37 |
| 2.5.2 Obtención de nejayote para cocción | 37 |
| 2.5.3 Preparación de las muestras | 37 |
| 2.5 Evaluación de propiedades químicas | 38 |
| 2.5.1 Humedad | 38 |
| 2.5.2 Cenizas | 38 |
| 2.5.3 Carbonatos de calcio | 39 |
| 2.6 Evaluación de propiedades texturales | 40 |
| 2.7 Evaluación de propiedades viscoelásticas | 43 |
| 2.7.1 Determinación de la zona de viscoelasticidad lineal | 43 |
| 2.7.2 Determinación de parámetros viscoelásticos | 44 |
| 2.8 Análisis estadístico | 44 |
| 2.9 Microscopía electrónica de barrido | 44 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 46 |
| 3.1 Caracterización de la materia prima | 46 |
| 3.2 Contenido de humedad de las masas nixtamalizadas | 47 |
| 3.3 Cenizas de las masas nixtamalizadas | 47 |
| 3.4 Carbonatos de calcio de las masas nixtamalizadas | 49 |
| 3.5 Propiedades texturales | 52 |
| 3.6 Propiedades viscoelásticas | 55 |
| 3.6.1 Zona de viscoelasticidad lineal | 55 |
| 3.6.2 Barridos dinámicos oscilatorios de frecuencia (método dinámico) | 57 |
| 3.7 Microscopía electrónica de barrido (SEM) | 66 |
| CONCLUSIONES | 69 |
| REFERENCIAS | 70 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Corte transversal de un grano de maíz | 4 |
| Figura 1.2 a) Reposo del maíz en la nixtamalización b) Nejayote | 13 |
| Figura 1.3 a) Resorte con constante elástica G b) Pistón inmerso en un aceite de viscosidad η | 22 |
| Figura 1.4 Respuesta oscilatoria de un material elástico, uno viscoso y uno viscoelástico por la aplicación de un esfuerzo sinusoidal | 24 |
| Figura 1.5 Ejemplos de barrido de amplitud y frecuencia durante la aplicación de las pruebas reológicas dinámicas | 25 |
| Figura 2.1 Cuadro metodológico | 30 |
| Figura 2.2 Costal de 50 Kg de maíz variedad Sinaloa | 31 |
| Figura 2.3 Homogenizador de granos Seedburo Quality | 31 |
| Figura 2.4 Equipo eléctrico para determinar la humedad Motomco | 32 |
| Figura 2.5 Balanza específica marca OHAUS para determinar peso hectolítrico | 33 |
| Figura 2.6 Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización | 34 |
| Figura 2.7 Molino manual marca “Nixtamatic” | 36 |
| Figura 2.8 Estufa para determinar humedad | 38 |
| Figura 2.9 Mufla para determinar cenizas | 39 |
| Figura 2.10 Retrotitulación | 39 |
| Figura 2.11 Muestras cilíndricas de masa para perfil de textura | 40 |
| Figura 2.12 Texturómetro LLOYD TA 500 | 41 |
| Figura 2.13 Curva generalizada de Análisis de Perfil de Textura (TPA) lograda en un texturómetro | 41 |
| Figura 2.14 a) Reómetro RT 20 Haake con sistema Peltier b) Muestra de masa | 43 |
| Figura 2.15 Respuesta típica a un barrido de deformación mostrando la región viscoelástica lineal | 44 |
| Figura 2.16 a) Preparación de muestras b) Microscopio electrónico de barrido | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 Porcentaje promedio del contenido de cenizas de masas a) Masas nixtamalizadas con diferentes porcentajes de sólidos de nejayote b) Masas nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y c) Masas nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y adicionadas con sólidos de nejayote | 48 |
| Figura 3.2 Contenido de carbonato de calcio de masas a) Nixtamalizadas con diferentes porcentajes de sólidos de nejayote b) Nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y c) Nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y adicionadas con sólidos de nejayote | 50 |
| Figura 3.3 Barrido de esfuerzos para masas testigos sin sólidos de nejayote a) G' en función del esfuerzo b) G'' en función de esfuerzo | 56 |
| Figura 3.4. a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote sin sólidos | 57 |
| Figura 3.5. a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote y 10% de sólidos | 59 |
| Figura 3.6 a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote y 20% de sólidos | 60 |
| Figura 3.7 a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote y 30% de sólidos | 62 |
| Figura 3.8 Imágenes de SEM tomadas a 30x. a) Masa testigo nixtamalizada sin sólidos de nejayote, b) Masa nixtamalizada con ND 1:1 con 30% SN | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Distribución en peso de las diferentes partes del grano | 5 |
| Tabla 1.2 Composición química proximal del grano de maíz de sus partes principales expresada en porcentaje de base seca | 6 |
| Tabla 1.3 Composición fisicoquímica del nejayote | 14 |
| Tabla 1.4 Parámetros medidos por TPA | 19 |
| Tabla 2.1 Diseño factorial mixto | 37 |
| Tabla 3.1 Propiedades físicas del maíz blanco variedad Sinaloa | 46 |
| Tabla 3.2 Propiedades texturales de las masas nixtamalizadas adicionadas con sólidos de nejayote bajo la prueba de análisis de perfil de textura | 52 |
| Tabla 3.3 Propiedades texturales de las masas nixtamalizadas adicionadas con nejayote bajo la prueba de análisis de perfil de textura | 53 |
| Tabla 3.4 Propiedades texturales de las masas nixtamalizadas adicionadas con sólidos y nejayote bajo la prueba de análisis de perfil de textura | 54 |
| Tabla 3.5 Parámetros reológicos a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con nejayote | 63 |
| Tabla 3.6 Parámetros reológicos a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con nejayote | 64 |
| Tabla 3.7 Parámetros reológicos a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con nejayote y sólidos de nejayote | 65 |
| Tabla 3.8 Comparación de propiedades texturales y reológicas para la prueba de microscopía electrónica de barrido (SEM) | 67 |

RESUMEN

La nixtamalización es un proceso importante por el aporte de calcio que proporciona al consumir sus productos. Sin embargo, durante este proceso se generan grandes cantidades de un desecho orgánico conocido como nejayote. El objetivo del trabajo fue evaluar las propiedades fisicoquímicas, texturales y reológicas de masas nixtamalizadas con nejayote y adicionadas con sólidos de nejayote. Un diseño factorial mixto 4 x 3 se aplicó a los tratamientos de masas nixtamalizadas adicionando nejayote, (sin sólidos, diluido; nejayote/agua 2:1, diluido; nejayote/agua 1:1) y sólidos de nejayote (10%, 20% y 30%), además se elaboró una masa control C nixtamalizada, y otras tres masas únicamente con 10, 20 y 30% de sólidos de nejayote. Se realizó una caracterización del maíz para evaluar su calidad, el cual fue apropiado para el proceso de nixtamalización. Para las masas nixtamalizadas, el nejayote fue separado y decantado para concentrar los sólidos de nejayote por evaporación para ser adicionados en la molienda húmeda. Para corroborar la estandarización del proceso de nixtamalización, se determinó la humedad en todas las masas, la cual resultó entre 57.6 y 58%, siendo ésta la humedad adecuada para la producción de tortillas de calidad. Los resultados mostraron que las cenizas y el CaCO_3 , aumentan significativamente en las masas cuando se nixtamaliza con nejayote y mayores concentraciones de sólidos de nejayote. Respecto a las propiedades texturales no hubo diferencia significativa en dureza y cohesividad de la masa adicionada con sólidos, pero al nixtamalizar con nejayote aumenta dureza y disminuye cohesividad. Sin embargo, con nejayote diluido 1:1 (nejayote/agua) y 30% de sólidos, estos parámetros no se ven afectados significativamente y aumenta la elasticidad total respecto a la masa control. Los parámetros viscoelásticos que se determinaron (G' , G'' y $\text{Tan } \delta$) resultaron semejantes al emplear diluciones de nejayote y concentraciones mayores de sólidos. Los resultados fueron corroborados con un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) en donde se observó que en la masa nixtamalizada con nejayote diluido 1:1 y adicionada con 30% de sólidos de nejayote, no hay cambios estructurales significativos, por lo que emplear diluciones de agua de nejayote y sólidos, sería una manera sencilla de generar menos residuos en la nixtamalización.

Palabras clave: carbonato de calcio, maíz, masa, nejayote, nixtamalización, textura

INTRODUCCIÓN

México produce principalmente maíz blanco, de este producto se generan alrededor de 22 millones de toneladas, de las cuales 12 millones se destinan a la industria harinera y masa de maíz nixtamalizado, principalmente (SE, 2010). El maíz blanco, es utilizado principalmente para consumo humano, el cual se ingiere en forma de tortilla, que se elabora a partir de masa de nixtamal o de harina de maíz nixtamalizada, así como atoles, tamales, pozole, entre otros productos (SIAP/SAGARPA, 2008). En México, la tortilla forma una parte básica de la dieta diaria, su consumo per cápita es de 225g diarios (Rojas-Molina *et al.*, 2009). La tortilla y sus derivados proveen el 38.8% de proteínas, 45.2% de calorías y 49.15% de calcio que se consume diariamente en la dieta mexicana (Figueroa *et al.*, 1994). La nixtamalización es un proceso que consiste en cocer el maíz con cal, el producto obtenido llamado nixtamal se lava con agua para eliminar el exceso de cal, éste se moltura en molinos de piedra para obtener una pasta suave y cohesiva conocida como masa (Bedolla y Rooney, 1984). Las condiciones del proceso dependen del tipo de maíz. El tratamiento alcalino que se le da al grano de maíz origina que la cantidad de calcio incorporado en el grano durante el proceso sea muy importante por diversas razones. La interacción entre calcio y los diferentes componentes del grano determina las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de productos como masa, tortillas y harinas instantáneas (Gutiérrez *et al.*, 2007). El tratamiento con cal en la nixtamalización facilita la remoción de pericarpio, controla la actividad microbiana, mejora el sabor, aroma, color, vida de anaquel y aumenta el valor nutricional de las tortillas (Rooney y Suhendro, 1999).

La cocción del maíz para la obtención del nixtamal se lleva a cabo utilizando grandes cantidades de agua, además se genera un desecho conocido como nejayote, el cual es muy contaminante debido a la presencia de cal, por lo que es un efluente altamente alcalino (pH=12-14), rico en sólidos solubles e insolubles, además de que se desechan generalmente en forma directa al drenaje a temperaturas elevadas entre 40 y 70 °C. Pflugfelder *et al.* (1988) determinaron que aproximadamente 50% de los sólidos en el nejayote son suspendidos y contienen alrededor de 64% de polisacáridos sin almidón, 20% de almidón y 1.4% de proteína. El otro 50% se compone de sólidos solubles que consisten en proteínas, azúcares, vitaminas y fitoquímicos ricos en fenoles y carotenoides. Debido a

la generación de este residuo contaminante se han propuesto nuevas tecnologías para nixtamalización como la extrusión, la cocción por microondas y radiación infrarroja.

En nuestros días, la regulación del tratamiento de nejayote es aplicado solamente en la industria de harinas instantáneas. Sin embargo, no hay regulación para el proceso de nixtamalización tradicional, por lo que Valderrama-Bravo *et al.* (2012) propusieron pre-tratar el nejayote por medio de filtraciones con la finalidad de separar los sólidos suspendidos. Por otra parte Gutiérrez-Uribe *et al.* (2010) y Niño-Medina *et al.* (2009), recuperaron algunos componentes químicos de nejayote con propiedades nutraceuticas.

Ramírez-Romero *et al.* (2011) recomiendan reutilizar el agua del nejayote en el proceso de nixtamalización para remover el maíz que queda en las tinas, lo cual resulta en un ahorro de agua potable y disminuye las descargas de aguas residuales al drenaje, además de que al reutilizar los sólidos en la molienda se obtiene un mejoramiento del sabor y consistencia de la tortilla. Sin embargo, no hay datos que comparen parámetros viscoelásticos, texturales, y químicos de masas obtenidas reutilizando el nejayote y los sólidos suspendidos en la molienda del maíz nixtamalizado. Por lo anteriormente expuesto, la finalidad del presente trabajo fue determinar las propiedades fisicoquímicas, texturales y reológicas de masas de maíz nixtamalizadas, reutilizando el agua y los sólidos del nejayote en el proceso de nixtamalización, para disminuir las cargas de aguas residuales al drenaje, así como la obtención de una masa que genere tortillas fortificadas con calcio.

1. ANTECEDENTES

1.1 Generalidades del maíz

1.1.1 Definición

La palabra maíz de origen indio caribeño, significa literalmente “lo que sustenta la vida”, y junto con el trigo y el arroz son los cereales más importantes del mundo (FAO, 1993). El maíz es el fruto de una gramínea, que se caracteriza por producir un fruto cubierto o protegido (Serna-Saldivar, 1996). El maíz (*Zea mays*) es el único cereal proveniente del Nuevo Mundo, principalmente de México, es usado para producir forraje y es la base de fabricación de una gran cantidad de alimentos, productos farmacéuticos y productos de uso industrial (www.imsa.com.mx, 2012).

1.1.2 Estructura del grano

En la Figura 1.1 se muestran las cuatro estructuras físicas principales del grano; pericarpio, cáscara o salvado, endospermo, germen o embrión y el pedicelo o cofia (FAO, 1993).

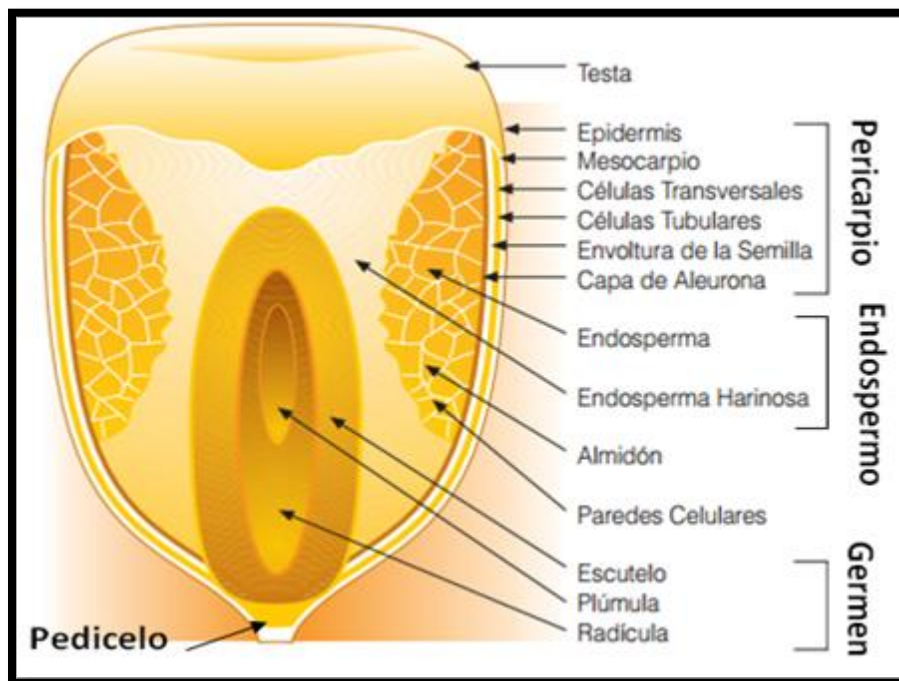


Figura 1.1 Corte transversal de un grano de maíz.
Fuente: <http://www.dsm.com> (2012), con modificaciones.

El porcentaje de distribución de las partes del grano de maíz se muestra en la Tabla 1.1. El pericarpio, que es una capa de células fibrosas, comprende el 5% del peso del grano. Es la estructura más externa de la semilla, comprende todas las capas exteriores. Su capa más externa es la epidermis, la cual da brillo al grano, después se encuentra el mesocarpio, el cual representa aproximadamente el 90% de la masa total del pericarpio, posteriormente se encuentran las células transversales que tienen como característica el cruce de capas y las células tubulares, las cuales forman una hilera de tubos longitudinales con una distribución grande de espacio intercelular, presionando fuertemente la testa que comunica directamente toda la superficie del endospermo (Watson y Ramstad, 1987).

Tabla 1.1 Distribución en peso de las diferentes partes del grano

| Estructura | Porcentaje |
|-------------------|-------------------|
| Pericarpio | 5-6 |
| Aleurona | 2-3 |
| Endospermo | 80-85 |
| Germen | 10-12 |

Fuente: FAO (1993)

La capa exterior del endospermo o capa de aleurona representa el 2% y contiene células con gránulos ricos en proteína y minerales así como pigmentos que hacen que los granos de ciertas variedades presenten un color azul, negro o púrpura. La testa es la capa más exterior de la semilla, imparte propiedades semipermeables al grano (FAO, 1993).

El endospermo, la mayor parte del grano, representa aproximadamente el 83% del peso, contiene un alto contenido de almidón y es el segundo tejido de reserva. Se ha clasificado como córneo (duro y translúcido), el cual se encuentra a los lados del grano compuesto por gránulos de almidón comprimidos en forma poliédrica y rodeados por una matriz de proteína gruesa; y el endospermo harinoso (blando y opaco) rodea la fisura central del grano, compuesto de gránulos de almidón esféricos, los cuales están rodeados por una matriz proteínica más delgada, su opacidad se debe a la refracción de luz sobre las bolsas de aire alrededor de los gránulos de almidón (FAO, 1993 y González *et al.*, 1997).

El germen equivale del 10% al 12% del peso del grano maduro, es considerado el primer tejido de reserva ya que almacena gran cantidad de nutrientes que son utilizados durante la

germinación, además de contener la mayoría de los lípidos. En el germen es donde se origina el tallo o plúmula y las raíces o radícula (Paredes-López *et al.*, 2006). El resto del grano corresponde a la piloriza, cofia, pedicelo o capa terminal, el cual es la continuación del pericarpio y permite la unión del grano con el olote, pero ocasionalmente se pierde durante el desgrane (Paredes-López *et al.*, 2006). Por medio de esta estructura, que se compone principalmente por celulosa, se transportan los nutrimentos que el grano necesita durante la etapa de crecimiento. Entre la base del germen y la punta se encuentra un tejido negro que funciona como sello del grano en la etapa madura (Klaus *et al.*, 1991).

1.1.3 Composición química del grano

En la Tabla 1.2, se encuentra la composición química proximal del grano de maíz de sus partes principales. El principal componente del grano es almidón (72%), además de proteínas (10.3%), lípidos (5%), cenizas (potasio 0.03%, fósforo 0.22%, magnesio 0.17%, azufre 0.12%, calcio 0.03%, sodio 0.01% y hierro 0.003%), fibra cruda (9%) y azúcares (Reyes, 1990).

Tabla 1.2 Composición química proximal de las partes principales del grano de maíz expresada en porcentaje de base seca.

| | Grano completo | Endospermo | Germen | Pericarpio | Pedicelo |
|--------------------------------|----------------|------------|--------|------------|----------|
| Grano completo | | 82.3 | 11.5 | 5.3 | 0.8 |
| Composición química (%) | | | | | |
| Proteína | 10.3 | 9.4 | 18.8 | 3.7 | 9.1 |
| Lípidos | 5 | 0.8 | 34.5 | 1.0 | 3.8 |
| Azúcares | 2.0 | 0.6 | 10.8 | 0.3 | 1.6 |
| Cenizas | 1.4 | 0.3 | 10.1 | 0.8 | 1.6 |
| Almidón | 72 | 86.4 | 8.2 | 7.3 | 5.3 |
| Fibra cruda | 9 | 2.7 | 8.8 | 86.6 | ---- |

Fuente: Paredes-López et al. (2006) y FAO (1993)

El contenido promedio de las proteínas del maíz es de 10%, de las cuales la mitad o tres cuartas partes se encuentran en la porción de endospermo. La calidad nutricional del maíz está determinada por la composición en aminoácidos de sus proteínas (FAO, 1993). En

general, los tipos de maíz ricos en proteína, tienden a ser duros y cristalinos, mientras que el grano blando tiene generalmente menos contenido de proteína (IICA, 1995).

El maíz contiene tres tipos de proteínas: la prolamina, soluble en alcohol, principalmente en forma de zeína, globulina neutra y glutelina. La zeína aporta casi la mitad de las proteínas totales del grano entero y, aproximadamente, la mitad de las contenidas en el endospermo. En el germen se hallan presentes sólo pequeñas cantidades de zeína, siendo la glutelina la principal proteína de esta parte del grano. La zeína es una proteína imperfecta por su deficiencia en 2 aminoácidos esenciales para la alimentación: lisina y triptófano del que sólo contiene residuos. Esta deficiencia se relaciona con la pellagra (pelle=piel y agra=seca), caracterizada por la dermatitis en las partes del cuerpo expuestas a la luz solar o a la fricción, inflamación de la boca y lengua, ocurriendo en algunos casos desórdenes mentales (IICA, 1995).

Los lípidos del grano de maíz se encuentran sobre todo en el germen (80-85%) y el resto en el endospermo, la proteína que contiene el germen está biológicamente bien equilibrada; lisina y triptófano (IICA, 1995).

El componente principal del grano de maíz es el almidón (aproximadamente 72%), el cual es un glucano compuesto por dos polímeros principales, amilopectina y amilosa y se encuentra en forma de partículas llamadas gránulos. El 60% de la masa de un gránulo de almidón se considera cristalino y el 30% aproximadamente amorfo. En las zonas amorfas se localiza la mayor parte de la amilosa, aunque también una fracción considerable de amilopectina. Las zonas cristalinas están formadas predominantemente por amilopectina, debido a su estructura ramificada, mientras que la amilosa por ser de estructura lineal puede disolverse fácilmente de la fracción cristalina del gránulo de almidón (Belitz y Grosh, 1999).

Los carbohidratos complejos, se encuentran principalmente en el pericarpio, aunque también en las paredes celulares del endospermo y en menor medida en el germen, otros carbohidratos que forman parte del grano son azúcares sencillos (glucosa, sacarosa y fructuosa), en cantidades que varían del 1 al 3%. La sacarosa es el azúcar más importante y se encuentra esencialmente en el germen (FAO, 1993).

El contenido de cenizas en el grano es de aproximadamente 1.4%, el germen proporciona casi el 78% de todos los minerales del grano, los más abundantes son el fósforo y el magnesio, encontrándose en su totalidad en el germen, otros minerales son potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, cobre y manganeso y zinc. El maíz tiene un contenido bajo en calcio. El total de fibra dietética en diferentes variedades de maíz es del 9%, correspondiendo a valores más elevados a la fibra insoluble y más bajos a la soluble (FAO, 1993).

En varios estados de la República Mexicana el cultivo de maíz constituye el sustento directo de millones de personas. La población mexicana satisface con el consumo de maíz entre un 60 y 75% de sus necesidades energéticas, un 60% de las proteínas y un 87% del calcio total cuando se consume en forma de tortilla (Paredes-López *et al.*, 2006), que se elabora a partir de masa de nixtamal o de harina de maíz nixtamalizada, así como atoles, tamales, pozole, entre otros (SIAP/SAGARPA, 2008).

1.1.4 Calidad del grano de maíz

La calidad del grano de maíz está determinada principalmente por la estructura y composición del grano. Las diferencias en estructura y composición dependen del cultivo así como de las prácticas de manejo, clima, suelo y los métodos de cosecha y postcosecha (Robutti, 2003). En México, la norma mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002, establece las características de calidad del maíz blanco comercializado e industrializado en el territorio nacional para el consumo humano, elaboración de tortillas y productos de maíz nixtamalizado. Contiene las especificaciones y métodos de prueba en cuanto a:

- ✓ Dureza del grano
- ✓ Color y olor
- ✓ Densidad (peso hectolítrico)
- ✓ Humedad del grano
- ✓ Textura
- ✓ Impurezas y granos quebrados

En esta norma también se encuentran otras pruebas recomendadas y especificaciones para material genéticamente modificado, aplicación de agroquímicos, microorganismos, insectos

y aflatoxinas; de acuerdo a estas características, el maíz se clasifica en: grado 1, grado 2 y grado 3, siendo el grado 1 el de mayor calidad. También se incluyen los parámetros de nixtamalización que permiten conocer la calidad de nixtamalización que tiene el maíz de acuerdo al tiempo de cocción en el medio alcalino, la cual se relaciona indirectamente con la dureza del grano mediante el índice de flotación y la cantidad de agua absorbida por el maíz (humedad del nixtamal), el pericarpio remanente y la pérdida de materia seca.

La dureza del endospermo determina en gran parte la velocidad de penetración del agua durante el cocimiento. Los granos suaves se hidratan rápidamente requiriendo tiempos cortos de cocción, pero son susceptibles a la sobrecocción. Los granos con dureza intermedia son adecuados para la nixtamalización ya que resisten cierto abuso o falta de control durante los procesos de producción de nixtamal y tortillas (Serna-Saldivar, 1993).

El establecimiento de rangos en la variabilidad de las características del grano, puede ser útil en la optimización de los procesos, aunque esto ocasionaría un aumento en el costo del maíz. Sin embargo, debido a las diferencias naturales que existen entre los granos de una misma mazorca y a las condiciones ambientales fuera del control humano siempre existirán variaciones en las características de los granos de maíz. Corresponde a los productores y procesadores del grano la responsabilidad de minimizar dicha variabilidad en el grano de maíz (Almeida-Domínguez *et al.*, 1996).

El tamaño del grano sobre las condiciones de nixtamalización se relaciona con la superficie total disponible para el intercambio de calor (calentamiento). Los granos grandes requieren más calor para cocerse que los granos pequeños debido a que tienen menor superficie total y los granos intermedios-grandes son deseables, ya que resisten cierto grado de sobrecalentamiento (Almeida-Domínguez *et al.*, 1996).

1.2 Nixtamalización

La nixtamalización es importante en México y en algunos países de América Central, Estados Unidos, Asia y Europa (Almeida-Domínguez *et al.*, 1996). El proceso de nixtamalización (del náhuatl *nixtli*= cenizas y *tamalli*= masa) se ha transmitido de generación en generación en Mesoamérica. En México todavía se utiliza esta técnica como en los tiempos de los aztecas; el maíz nixtamalizado era molido en un metate para producir

masa que era utilizada para formar a mano discos de masa que luego eran cocidos en un comal de barro. El producto resultante era llamado *tlaxcalli* por los aztecas y posteriormente nombrado tortilla por los españoles (Paredes-López *et al.*, 2006).

La nixtamalización tradicional es la base de métodos comerciales para producir tortillas y una gran variedad de botanas de maíz y productos típicos mexicanos como tamales, gorditas, chilaquiles, tostadas y tacos, entre otros (Rojas-Molina *et al.*, 2008; Gutiérrez *et al.*, 2007).

Durante el proceso de nixtamalización, los granos de maíz son cocidos en una solución de hidróxido de calcio que va de 0.5 a 2%, respecto al peso del maíz (Gutiérrez *et al.*, 2007), dejando un tiempo de reposo de 1-24 h. Posteriormente una porción de calcio es depositada en el líquido sobrenadante llamado nejayote (Rojas-Molina *et al.*, 2009). El nejayote es drenado y entonces los granos cocidos (nixtamal) son lavados para remover el exceso de cal y materia seca (Gutiérrez *et al.*, 2007; Gutiérrez-Cortez *et al.*, 2010). Posteriormente el nixtamal es pasado a la operación de molienda (Trejo-González *et al.*, 1982). Al producto resultante de esta molienda se le denomina masa y es ingrediente básico para la formulación de tortillas, la cual se puede definir como un pan no leudado elaborado a partir de maíz nixtamalizado (Serna-Saldivar, 1996). Alternativamente el nixtamal puede ser molido y secado para obtener harina instantánea (Fernández-Muñoz *et al.*, 2006).

La cocción del maíz en cal tiene varias ventajas: facilita la remoción del pericarpio, controla la actividad microbiana, mejora la absorción de agua, aumenta la gelatinización de los gránulos de almidón, también afecta positivamente el sabor, color, aroma, vida de anaquel, y valor nutricional de la tortilla al liberar a la niacina (Serna-Saldivar *et al.*, 1987; Bressani, 1992).

Las características químicas de la solución alcalina durante la cocción deben ser tales que la concentración de cal siempre exceda el punto de saturación del hidróxido de calcio, el cual bajo condiciones ambientales es de 0.15%. Las concentraciones empleadas de cal son de 0.8% a 2.1% con un pH inicial de 12.4. Después de la cocción, el pH residual del nejayote es de aproximadamente 11.0. Para remover el exceso de cal, el maíz se lava hasta que el

agua alcance un pH de 8.5, de otra manera, el resultado es un sabor alcalino en la masa y en las tortillas (Trejo-González *et al.*, 1982).

La nixtamalización es responsable de importantes características fisicoquímicas, nutricionales y sensoriales de los productos del maíz incluidos el retiro del pericarpio, la incorporación del calcio dentro del núcleo, mejorar la biodisponibilidad de la niacina y la formación de compuestos de sabor y color que imparten características organolépticas típicas al producto final (Andreasen *et al.*, 2001).

La cal penetra en el grano a través del germen, la parte anatómica que tiene la mayor concentración de calcio después de la cocción y el remojo. La cal también afecta el color de la tortilla. Incluso cuando las tortillas se producen de granos blancos, una alta concentración de cal forma un producto final amarillento. La intensidad de color está relacionada con los pigmentos carotenoides, flavonoides y el pH (Rooney, 1999).

Valderrama-Bravo *et al.* (2010) mostraron que durante el tiempo de reposo del proceso de nixtamalización ocurren diversos mecanismos de absorción de calcio dentro del grano de maíz. Los análisis de microscopía electrónica de barrido tomados a 1 h de reposo ilustraron la formación de un *cluster*¹ de calcio. Durante este periodo de reposo las paredes de las células de granos de maíz son solubilizados, quedando fracciones de pericarpio y residuos de almidón en el nejayote, confiriendo a esta agua de desecho sólidos ricos orgánicamente.

La cantidad de calcio incorporado durante el proceso de nixtamalización dentro del grano de maíz es muy importante. Trejo-González *et al.* (1982) reportaron que la nixtamalización beneficia desde el punto de vista nutricional, debido a que el calcio se incorpora al grano de maíz enlazándose con el almidón y aumentando aproximadamente tres veces la cantidad de calcio disponible con relación al determinado en muestras sin nixtamalizar. Por su parte Cornejo-Villegas *et al.* (2010) mencionan que la interacción entre el calcio y los demás componentes del grano de maíz influye en las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de los productos finales. Así mismo los autores mencionan que el contenido de calcio en los productos nixtamalizados es importante desde el punto de vista nutricional, dada la importancia del calcio en la dieta humana, lo cual es importante porque evita la

¹ Conglomerado (Racimo)

osteoporosis, que se manifiesta como fragilidad de los huesos por pérdida de masa del sistema óseo. La absorción del calcio es favorecida por la vitamina D, la saturación del ácido fítico con cal, durante la nixtamalización, favorece la absorción de otros minerales traza (Urizar y Bressani, 1997).

El maíz, como todos los cereales, es deficiente en aminoácidos esenciales (lisina y triptófano) y también en niacina, vitamina del complejo B. Sin embargo, el proceso de nixtamalización hace que la tortilla tenga mayor calidad nutricional comparada con el maíz crudo (Figueroa *et al.*, 1994).

Se han identificado algunos factores fundamentales para controlar el proceso de nixtamalización, los cuales se encuentran a través de todo el proceso de nixtamalización y son los siguientes:

- ✓ Establecimiento del tiempo de cocimiento de granos de maíz
- ✓ Volumen de agua utilizada para cocer los granos de maíz
- ✓ Perfil de tiempo-temperatura empleado durante la etapa de cocción y reposo del maíz
- ✓ Cantidad de hidróxido de calcio adicionado durante el cocimiento
- ✓ Número de veces y duración del mezclado en la etapa de cocción
- ✓ Duración del tiempo de reposo de los granos de maíz en el líquido de cocimiento
- ✓ Tiempo de drenado del nejayote
- ✓ Forma, duración y número de lavados del nixtamal
- ✓ Tiempo de drenado del agua de lavado
- ✓ Velocidad de alimentación en la molienda húmeda
- ✓ Abertura de los elementos molientes (discos de piedra o metal)
- ✓ Tamaño del granulado obtenido (masa)
- ✓ Volumen de agua adicionado durante la hidratación del granulado

(Hernández-Sámamo, 2009)

1.3 El Nejayote

Uno de los inconvenientes de la nixtamalización cuando se aplica a escala mayor es el gasto de energía para el cocimiento del maíz y el uso de grandes cantidades de agua para la cocción y el lavado del maíz, además de la producción del nejayote; un efluente altamente contaminante debido a su pH alto (12-14) temperatura elevada 40 y 70 °C y sólidos en suspensión: cascarilla de maíz y granos rotos (Ochoa y Viniegra, 2009). El nejayote tiene altas concentraciones de materia orgánica en suspensión y en solución debido al uso de hidróxido de calcio en el proceso. El nejayote contiene 2.28% de sólidos secos, que incluye parte del pericarpio, hemicelulosa, carbohidratos, proteínas, calcio, endospermo, pequeñas partes del germen y carotenoides (pigmentos), responsables de su color amarillo. Debido a los altos volúmenes de nejayote producidos durante la nixtamalización (nejayote 5:1 peso inicial de maíz), y por su elevada concentración de materia orgánica, el nejayote obtenido en las fábricas de nixtamalización se considera altamente nutricional (Velasco-Martínez *et al.*, 1997).

El nejayote es un agua de desecho altamente contaminante que contiene altas concentraciones de sólidos solubles e insolubles (Figura 1.2). Pflugfelder *et al.* (1988) reportaron que aproximadamente 50% de los sólidos de nejayote son sólidos insolubles y contienen cerca del 64% de polisacáridos, 20% almidón y 1.4% proteína. El otro 50% fue considerado como sólidos solubles. Los sólidos suspendidos del nejayote son generalmente removidos por centrifugación, decantación o filtración.



a)



b)

Figura 1.2 a) Reposo del maíz durante la nixtamalización b) Nejayote

Fuente: a) Archivo El Universal, 2010

En la siguiente Tabla 1.3 se presenta la composición fisicoquímica del nejayote:

Tabla 1.3 Composición fisicoquímica de nejayote

| Contenido | Nejayote |
|--|------------------------|
| Sólidos totales (%) | 2.28 ± 0.18 |
| Humedad (%) | 97.72 ± 0.2687 |
| pH | 11.39 ± 0.49 |
| Densidad (kg/m³) | 1003.54 ± 2.45 |
| Viscosidad (Pa s) | 0.002301 ± 4.3127 E-05 |
| Grasa (%) | 0.0082 ± 0.002 |
| Cenizas (%) | 0.7672 ± 0.014 |
| Proteína (%) | 0.1130 ± 0.007 |
| Fibra (%) | 0.5810 ± 0.013 |
| Carbohidratos (%) | 0.8628 ± 0.016 |
| Calcio(mg/L) | 1526 ± 26.53 |
| Conductividad eléctrica (µS/cm) | 4510 ± 14.14 |
| Demanda Biológica de Oxígeno (mg/L) | 14218.75 ± 309.36 |
| Demanda Química de Oxígeno (mg O₂/L) | 40058.14 ± 82.22 |
| Dureza (mg/L) | 5768.67 ± 0.46 |
| Sólidos sedimentables (µL /L) | > 100000 |
| Sólidos totales suspendidos (mg/L) | 8342.5 ± 25.30 |
| Turbidez (NTU) | 963.3 ± 6.6 |

(Valderrama-Bravo *et al.*, 2012)

En la nixtamalización típica, procesando 50 kg de maíz a diario, se usan alrededor de 75 litros de agua y se genera una cantidad equivalente de agua de desecho alcalina (Niño-Medina *et al.*, 2009). Salmeron-Alcocer *et al.* (2003) calcularon que 600 ton maíz/día genera entre 1500 y 2000m³ de nejayote. En relación al grano de maíz, y considerando que la absorción de agua en el nixtamal va desde 14 hasta alrededor del 56%, la cantidad estimada mensualmente de nejayote generado en México es cerca de 1.2 millones de m³ (Gutiérrez-Uribe *et al.*, 2010).

El nejayote obtenido de la nixtamalización se considera agua de desecho porque los efluentes generados durante la nixtamalización son potencialmente dañinos para el medio ambiente. Esto es debido a su composición fisicoquímica, como se observa en la Tabla 1.3, el nejayote tiene una demanda bioquímica de oxígeno, 14218.75 mg/L, demanda química de oxígeno 40058.14mgO₂/L, total de sólidos suspendidos 8342.5 mg/L, y alcalinidad total de 5768.67 mg CaCO₃ (Rosentrater, 2006; Valderrama-Bravo *et al.*, 2012). En otro aspecto, el nejayote tiene alto contenido de polisacáridos no celulósicos, los cuales son importantes por sus propiedades funcionales en alimentos como espesantes, estabilizantes, emulsificantes y formadores de películas o geles (Niño-Medina *et al.*, 2009). Otros autores reportan componentes antioxidantes que lixivian desde el interior del nejayote, los cuales están enlazados a la pared celular del pericarpio en maíz crudo y son desencadenados por el tratamiento térmico alcalino (González *et al.*, 2004; De la Parra *et al.*, 2007; Del Pozo-Insfran *et al.*, 2007; Gutiérrez-Uribe *et al.*, 2010).

Valderrama-Bravo *et al.* (2012) realizaron un tratamiento de nejayote por filtración en el cual lograron eliminar el 50% de los sólidos suspendidos, por lo que sugieren una alternativa de aplicación controlada de los sólidos de nejayote para ser utilizado como abono en suelos ácidos para incrementar la absorción de calcio en plantas y árboles (Littke y Zabowsky, 2007), lo cual podría influir en el rendimiento de productos hortícolas. Asimismo, el carbonato de calcio contenido en el nejayote representa una alternativa para el control del grado de suelos supresivos contra microorganismos que atacan las raíces de las plantas, como *Aphanomyces auteiches* (Heyman *et al.*, 2007).

1.4 Calidad de la masa de maíz nixtamalizada

La masa de maíz es una mezcla constituida por los polímeros de almidón (amilosa y amilopectina) mezclados con gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, gránulos intactos, partes de endospermo y lípidos. Estos componentes forman una malla compleja heterogénea dentro de una fase acuosa continua (Gómez, 1987).

La producción comercial de harinas de maíz instantánea tiene diferencias en cuanto al proceso de nixtamalización tradicional. La producción industrial de masa no sigue las condiciones tradicionales de nixtamalización, por lo que se obtienen tortillas cuya textura y estabilidad durante el almacenamiento son de menor calidad comparadas con las obtenidas en forma casera o con procesos a menor escala (Bello *et al.*, 2002). Las principales modificaciones tradicional incluyen la reducción del tiempo de cocción alcalina, el tiempo de remojo de los granos cocidos, el número de lavados para remover el exceso de cal y el tiempo de reposo después del proceso de lavado (Gasca y Casas, 2007).

La industria de la tortilla representa aproximadamente 1 a 5 de todo el mercado en México, con una producción anual estimada de 11.5 millones de toneladas, produciendo ventas de 7 billones de dólares (SIAP/SAGARPA, 2008). Plascencia (2004) y Rojas Molina *et al.* (2007) han estimado que el consumo de tortilla en las últimas 4 décadas ha caído cerca de 15%. La industria harinera nacional está realizando un esfuerzo para complementar la tortilla elaborada con harina nixtamalizada con la adición de proteína, minerales y vitaminas. En este aspecto se espera enriquecer este tipo de tortilla que representa el 23% del consumo en México; sin embargo no se ha contemplado el 37% de la tortilla que se elabora con masa de molinos de nixtamal comerciales ni el 40% de la tortilla elaborada en zonas rurales. Por esta razón se deben desarrollar tecnologías sencillas y baratas para complementar o enriquecer la tortilla hecha con masa proveniente del sector molinero no industrial (Paredes-López *et al.*, 2006).

El contenido de calcio en el maíz es de 30 ppm (Bartolo, 1999), esta cantidad es baja comparada con los requisitos mínimos para una alimentación adecuada, ya que el calcio es uno de los elementos principales de composición de los huesos. Durante el cocimiento alcalino que se lleva a cabo en la nixtamalización, la mayor parte del calcio es retenido en

el pericarpio; por lo que es de importancia que cierta cantidad del pericarpio que se desecha con el nejayote pase a formar parte de la masa o de la harina. El pericarpio representa la estructura más importante en el grano, ya que en esta parte del grano se regula el calcio y la difusión del agua en las estructuras internas del grano de maíz (Gutiérrez *et al*, 2007).

1.5 Propiedades químicas de la masa del maíz

La cocción alcalina y el remojo en la nixtamalización provocan la disolución y el hinchamiento de las capas del pericarpio, lo que hace que las paredes celulares y los componentes de la fibra dietaria del grano se vuelvan frágiles facilitando su remoción, por lo que disminuye el contenido de la fibra dietaria. Por el contrario, la fibra dietaria soluble se incrementa de 0.9% en el maíz a 1.3% en la masa y a 1.7% en la tortilla. La fibra dietaria en general, ha sido reconocida como un componente importante y altamente deseable en los alimentos que ejerce diversas funciones fisiológicas asociadas a la salud (Paredes-López *et al.*, 2006).

En la actualidad, se ha avanzado en el entendimiento del proceso de nixtamalización y sus efectos en el grano de maíz considerando el origen anatómico-estructural de las partículas que constituyen el nixtamal y la masa además de la relación entre el contenido de calcio y las transformaciones estructurales y morfológicas del grano procesado. Rojas-Molina *et al.* (2008) encontraron que las transformaciones en las propiedades térmicas y en la estructura cristalina del almidón en el endospermo del grano nixtamalizado son más evidentes en las capas más externas de esta estructura, donde la fijación del calcio también es mayor.

El proceso de nixtamalización induce cambios en el contenido de macronutrientes, se disminuye la fibra dietética y los lípidos, y hay un pequeño aumento en el contenido de minerales. En el proceso se llevan a cabo pérdidas sustanciales de B1, B2 y niacina, así como en carotenos cuando el maíz es amarillo. La niacina residual es altamente biodisponible, al igual que el triptófano, además de una mejor relación leucina-isoleucina, lo cual ayuda a que la población no desarrolle pelagra, como ha ocurrido en poblaciones que no consumen maíz no nixtamalizado (Rojas-Molina *et al.*, 2009).

El proceso térmico alcalino conlleva a importantes interacciones entre el calcio y los diferentes componentes químicos del maíz, que determinan las características sensoriales y

fisicoquímicas como: hidratar al grano, suavizar el pericarpio, desnaturalizar proteínas, gelatinización parcial del almidón, entre otros y las nutritivas, tales que le confieren a los productos una calidad adecuada. El contenido de calcio en este producto es importante desde el punto de vista nutricional en la dieta humana (Fernández-Muñoz *et al.*, 2006)

Tomando en cuenta el consumo diario de productos nixtamalizados, el calcio de las tortillas provee de más de la mitad del calcio ingerido *per cápita* en México. La nixtamalización reduce los problemas asociados a la deficiencia de este mineral (Paredes-López *et al.*, 2006).

1.6 Textura

La textura es un factor de aceptabilidad sensorial importante para la aprobación de algunos alimentos por parte del consumidor. Las propiedades texturales de un alimento son el grupo de características físicas que dependen de los elementos estructurales del material y se relacionan con la deformación, desintegración y flujo por la aplicación de una fuerza. Una propiedad importante del alimento que se asocia con la textura es su comportamiento reológico (Rodríguez *et al.*, 2005).

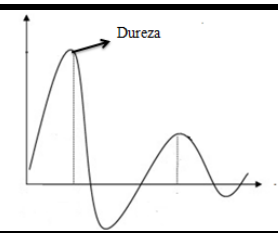
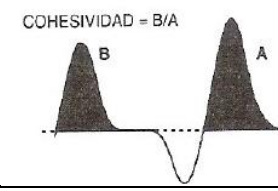
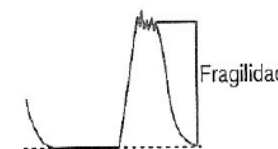
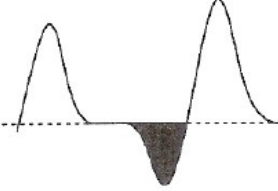
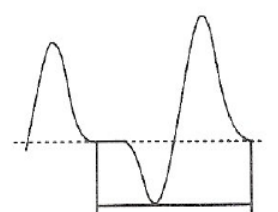
Se han desarrollado técnicas instrumentales para la evaluación de la textura de la masa. Bourne (1978) plantea que existen tres tipos de medidas instrumentales para valorar la textura:

- ✓ Medidas fundamentales son las que valoran propiedades tales como esfuerzo de ruptura, relación de Poisson, módulo de Young, módulo de cizalla y otros.
- ✓ Medidas empíricas cubren una serie de ensayos empíricos tales como penetración, cizalla, extrusión y otros. Estos ensayos empíricos se correlacionan bastante bien con la evaluación sensorial de textura de los alimentos.
- ✓ Medidas imitativas son las logradas con instrumentos sensibles a la deformación o analizadoras de textura.

Un ensayo imitativo que proporciona valores estándar de la textura de los alimentos es el Análisis de Perfil de Textura (TPA-Texture Profile Analysis), creado por General Foods a mediados de los años 60, es una prueba que mide la fuerza en compresión, en donde una muestra del alimento sólido o semisólido de dimensiones y forma específica es comprimido

y descomprimido dos veces; a una distancia y velocidad determinada, simulando la masticación. Entre cada compresión se espera unos segundos (Rosenthal, 2001). Del análisis de las curvas obtenidas en el Análisis de Perfil de Textura se logran 7 parámetros texturales definidos en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Parámetros medidos por TPA

| Parámetro | Definición | Definición instrumental |
|------------------------|--|---|
| Dureza (D) | Es la fuerza máxima en el primer ciclo de compresión y se define como la fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada. |  |
| Cohesividad (C) | Se define como la resistencia de los enlaces internos que forman el cuerpo del material. Se calcula como el área total bajo la curva del segundo ciclo de compresión (B) sobre el área total bajo la curva del primer ciclo (A). | $COHESIVIDAD = B/A$  |
| Fragilidad (F) | Es el primer pico significativo en la curva del primer pico de compresión. |  |
| Adhesividad | Es el área negativa del primer ciclo de compresión. Representa el trabajo necesario para retirar el sensor de la muestra |  |
| Elasticidad | Es la altura que la muestra recupera entre el término del primer ciclo de compresión y el inicio del segundo. |  Ciclo=Segundo contacto-Primer contacto Elasticidad=ciclo para un material inelástico-ciclo para el alimento |
| Gomosidad | Es el producto de la dureza y cohesividad | |
| Masticosidad | Es el producto de gomosidad y elasticidad | |

Fuente: Rosenthal, 2001; Casas y Ramírez, 1998

La textura de los alimentos es una experiencia humana que surge de la interacción con el alimento, su estructura y comportamiento cuando es manipulado, la textura nos ayuda a comprender la respuesta a la estructura del alimento desde aspectos de fisiología y psicología de la percepción, además de estudios físicos y químicos de la composición y estructura de los productos alimenticios cuando son deformados o cizallados (Rosenthal, 2001).

1.6.1 Propiedades texturales de la masa de maíz

La textura de la masa es crítica para la elaboración de la tortilla. Cuando la masa tiene la textura adecuada, es lo suficientemente adhesiva para pegarse ligeramente a los rodillos laminadoras de la máquina tortilladora y separarse adecuadamente. Si el maíz está sobrecocido, la masa es pegajosa y se adhiere fuertemente a los rodillos; el maíz sub-cocido produce una masa poco cohesiva, inadecuada para la formación de una tortilla (Ramírez, *et al.*, 1993).

Durante la nixtamalización se originan reacciones bioquímicas importantes que modifican las características fisicoquímicas, microbiológicas, texturales y reológicas de la masa (Rodríguez *et al.*, 2005), el mayor porcentaje de los cambios ocurridos durante la nixtamalización se debe a las modificaciones que sufre el almidón, principal componente del grano de maíz (72-78%). El estudio de la gelatinización del almidón es importante para el desarrollo de las propiedades texturales y reológicas de la masa empleada para la producción de tortillas (Arámbula-Villa *et al.*, 2001). El almidón es el componente químico mayoritario del grano de maíz, el cual se localiza en paquetes o gránulos recubiertos por una matriz proteínica. El almidón se conforma por dos estructuras macromoleculares: la amilosa y la amilopectina, las cuales mantienen una organización estructural y un arreglo relativo en el interior de los gránulos de almidón. Este orden se manifiesta en la estructura cristalina de estos glucanos, el cual se modifica durante el proceso de nixtamalización (Rojas-Molina *et al.*, 2008).

Durante la nixtamalización, pequeñas cantidades de gránulos de almidón son gelatinizados y la mayor gelatinización se debe a la fricción durante la molienda, en la cual también se dispersan parcialmente los gránulos hinchados dentro de la matriz, los que actúan como un

pegamento que mantiene unidas las partículas de masa. Mucho almidón gelatinizado (debido a un cocimiento excesivo) produce una masa pegajosa que es difícil de manejar. En cambio poca cocción produce una masa sin cohesividad que da origen a tortillas de textura inadecuada (Bello *et al.*, 2002).

La masa, como muchos otros alimentos, es un material viscoelástico. Durante su obtención, manejo y utilización para la elaboración de tortilla y otros productos, es sometida a diferentes tipos de fuerzas con muy diferentes niveles de compresión, incluyendo las operaciones por las cuales el molinero juzga la textura de manera empírica (Gómez *et al.*, 1987).

1.7 Viscoelasticidad

La reología se define como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia. Se utiliza en la ciencia de los alimentos para definir la consistencia, la cual se puede clasificar en viscosidad o flujo viscoso, elasticidad o deformación elástica y viscoelasticidad. El conocimiento de la reología es esencial para el diseño del proceso y la evaluación de la calidad del producto (Rao, 1992). Existen diferentes criterios para establecer la clasificación de los materiales con base en su comportamiento reológico. La manera más general de clasificar el comportamiento de los materiales los divide en tres categorías (García-Rejón, 1981):

- ✓ Sólido de Hooke, materiales que obedecen la Ley de Hooke
- ✓ Materiales viscoelásticos
- ✓ Fluido newtoniano, materiales que obedecen la Ley de Newton

Tanto el comportamiento sólido de Hooke como el comportamiento fluido newtoniano, son casos ideales, pero muchos de los sistemas alimenticios se encuentran entre estos dos y quedan incluidos dentro del comportamiento viscoelástico (Casas y Ramírez, 1998). El comportamiento de un fluido newtoniano se representa mediante un pistón trabajando en un cilindro, mientras que un comportamiento elástico (como el de un sólido de Hooke) es representado con un resorte (Bourne, 2002).

Las ecuaciones de estado reológicas se expresan como funciones matemáticas que relacionan el esfuerzo con la deformación relativa y el tiempo o con la velocidad de

deformación relativa. Las ecuaciones de estado reológicas más conocidas son las siguientes (Goodwin y Hughes, 2000):

La ley de Hooke, para un sólido completamente elástico:

$$\sigma = G\gamma \quad \text{Ecuación 1}$$

Y la de Newton de la viscosidad, para un fluido completamente viscoso:

$$\sigma = \mu\dot{\gamma} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

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

$$G = \text{Módulo elástico} \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

$$\gamma = \text{Deformación relativa (adimensional)}$$

$$\mu = \text{Viscosidad newtoniana (Pa} \cdot \text{s)}$$

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

En la siguiente Figura, el pistón (Figura 1.3 b) representa la disipación de energía en forma de calor para hacer fluir un líquido newtoniano, mientras que el resorte (cuerpo elástico), (Figura 1.3 a) simboliza la energía almacenada por el material.

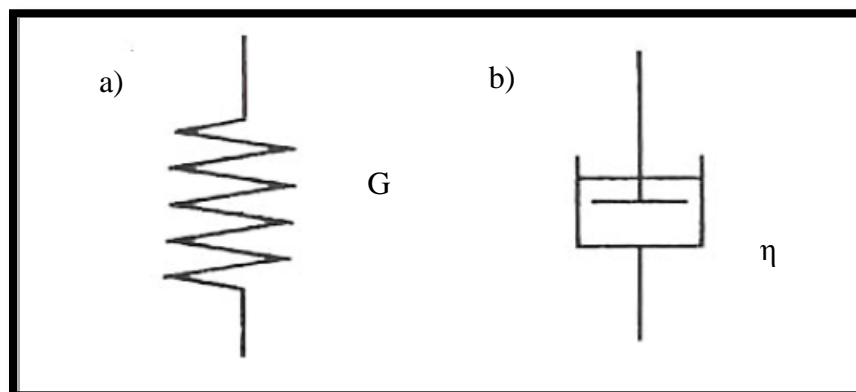


Figura 1.3 a) Resorte con constante elástica G b) Pistón inmerso en un aceite de viscosidad η
Fuente: Bourne, 2002

Con el pistón, el esfuerzo aplicado es independiente de la deformación aplicada, contrariamente a lo que ocurre con el resorte, en el cual el módulo G o E es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación (Bourne, 2002). Para un sólido que sigue la ley de Hooke, la energía aplicada al deformarlo se almacena como energía potencial, la cual es recuperable (Goodwin y Hughes, 2000).

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). El conocimiento de las propiedades viscoelásticas es muy útil ya que nos ayuda a entender la interrelación entre la estructura y la respuesta mecánica lineal de las macromoléculas (Ferry, 1980).

Mientras más completa y resistente a la ruptura es la estructura, más pronunciada es su elasticidad, y mientras más fácil se rompa su estructura, mayor es su comportamiento viscoso (Borwankar, 1992). Dentro de las propiedades viscoelásticas de estos materiales medidos en intervalos de esfuerzos y deformaciones de los cuales existen dos tipos, aquellos considerados como:

- ✓ Viscoelásticos lineales (Hookeano).- En los cuales las propiedades viscoelásticas son una función del tiempo y no de la magnitud de la deformación ni de la velocidad de deformación.
- ✓ Viscoelásticos no lineales (No Hookeano).- Estos materiales exhiben propiedades mecánicas que son función del tiempo y de la magnitud del esfuerzo aplicado (Goodwin y Hughes, 2000).

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 (stress-relaxation) y la de esfuerzo constante (creep).

- ✓ Métodos oscilatorios ó dinámicos: Son los métodos que involucran la aplicación ya sea de un esfuerzo o una deformación oscilatoria (Rao, 1992).

En las pruebas dinámicas oscilatorias, las muestras se someten a un movimiento que varía armónicamente con el tiempo (movimiento oscilatorio), utilizando geometrías específicas. En la Figura 1.4 se muestra la caracterización de los materiales en función a la respuesta obtenida al aplicar un esfuerzo ó una deformación oscilatoria.

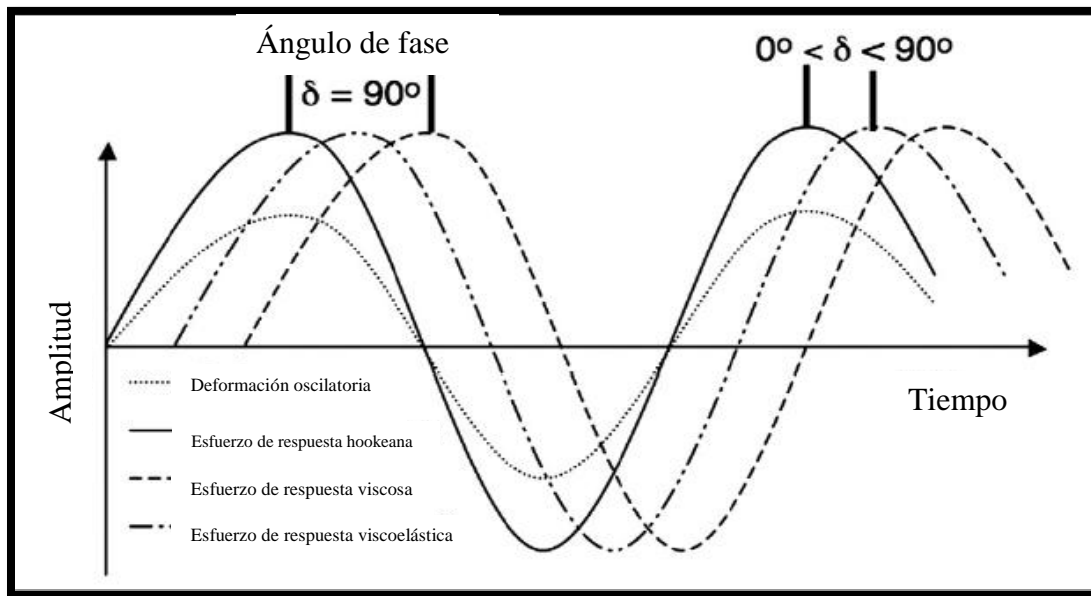


Figura 1.4 Respuesta oscilatoria de un material elástico, uno viscoso y uno viscoelástico por la aplicación de un esfuerzo sinusoidal
Fuente: Goodwin y Hughes, 2000

Las pruebas dinámicas muestran como, al aplicar una deformación o velocidad de deformación en forma oscilatoria continua a un esfuerzo constante o al aplicar un esfuerzo cortante de forma oscilatoria a una velocidad de deformación fija, aparece una onda sinusoidal de esfuerzo (Ferry, 1980). Para un sólido ideal, el esfuerzo está en fase con la deformación, mientras que para un líquido ideal se presentará un desfase de 90° entre el esfuerzo y la deformación. Si el material es viscoelástico, el ángulo de desfase se encontrará entre 0 y 90° (Mitchell, 1980).

Para desarrollar este método se utiliza un reómetro (Figura 1.5), en el cual es factible determinar la región viscoelástica lineal de la muestra.

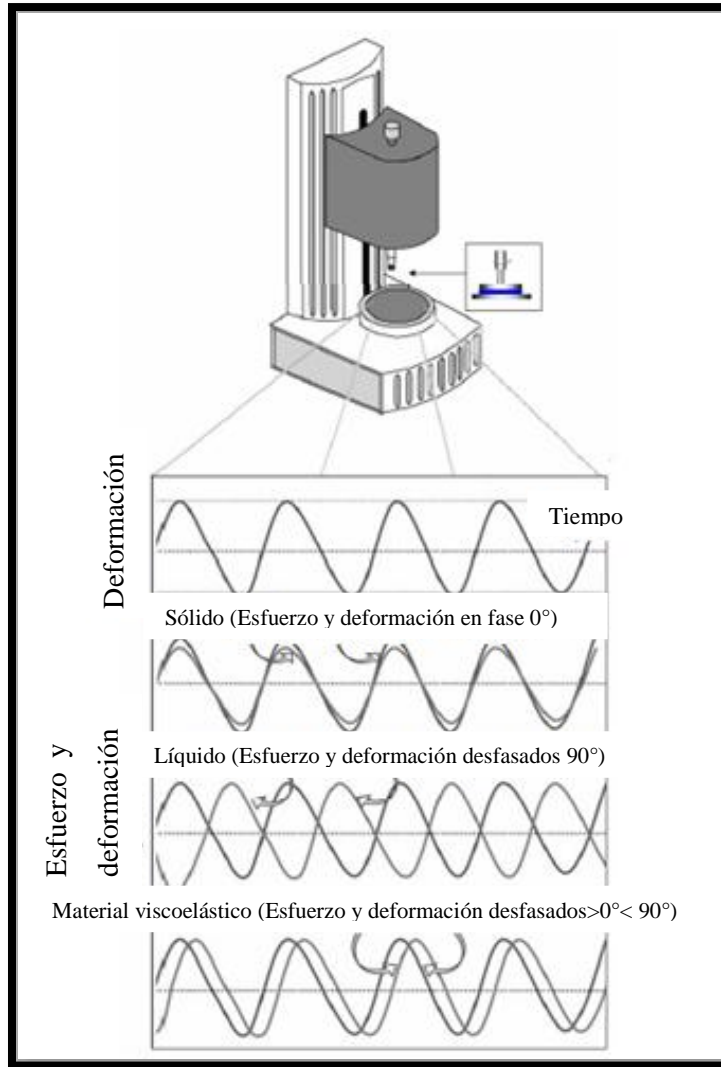


Figura 1.5 Ejemplos de barridos de amplitud y frecuencia durante la aplicación de las pruebas reológicas dinámicas

Fuente: Steffe, 1992

La zona de viscoelasticidad lineal es el comportamiento viscoelástico más simple, bajo un esfuerzo o deformación suficientemente pequeño la estructura molecular prácticamente no se modifica y se puede determinar el comportamiento viscoelástico lineal, en las pruebas dinámicas oscilatorias se obtiene un barrido de deformación o esfuerzo, según sea el caso (Goodwin y Hughes, 2000).

Dado que en la región lineal, las propiedades reológicas no son dependientes de la deformación ni del esfuerzo, se procede a obtener un barrido de frecuencia, el cual señala

los cambios en el comportamiento elástico y viscoso de la muestra con el tiempo de aplicación de la deformación o del esfuerzo (Ferry, 1980; Macosko, 1994). Con los resultados de los experimentos dinámicos son representados por las funciones materiales G' (módulo de almacenamiento), G'' (módulo de pérdida) y $\tan \delta$.

El módulo de almacenamiento o elástico G' (Pa), ha sido definido como el esfuerzo en fase con la deformación, dividida por la deformación, en una prueba sinusoidal, y representa una medida de la energía recuperada y almacenada por el material en un ciclo, y es el indicador del componente elástico del material. Es una función de la frecuencia y se puede expresar como:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: $\sigma_0 = \text{amplitud del esfuerzo de corte } \left(\frac{N}{m^2}\right)$

$\gamma_0 = \text{amplitud de la deformación (adimensional)}$

$\delta = \text{ángulo de desfasamiento (rad)}$

El módulo G'' (Pa), es el módulo de pérdida y se define como el esfuerzo desfasado 90° respecto a la deformación, dividida por la deformación, en una prueba de deformación sinusoidal: este parámetro es una medida de la energía disipada como calor por el material en un ciclo y es un indicador del componente viscoso del material:

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad \text{Ecuación 4}$$

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

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad \text{Ecuación 5}$$

Este parámetro adimensional indica la relación entre la cantidad de energía perdida y la energía almacenada por el material, o sea, entre la porción viscosa y elástica de la muestra

en un ciclo de deformación. Mientras el ángulo de fase se aproxima a cero, el material se comporta más como un sólido elástico, y si se aproxima a 1.57 radianes (90°), el material se comporta de manera similar a un líquido newtoniano (Goodwin y Hughes, 2000).

1.7.1 Propiedades viscoelásticas de la masa de maíz

Las medidas mecánicas dinámicas u oscilatorias están cobrando un interés creciente debido a que permiten caracterizar las propiedades viscosas y elásticas de los materiales. En el método dinámico, se aplican esfuerzos a bajas magnitudes, al retirar el esfuerzo de la muestra, esta vuelve a su estado normal (dependiendo de su composición), se utilizan mínimas deformaciones y velocidades (Bourne, 2002).

Escalante-Aburto *et al.*, (2011), evaluaron las propiedades viscoelásticas de las masas de maíz (acondionadas a una humedad del 50%) elaboradas con nixtamal, harina comercial de maíz nixtamalizado y harina de maíz extruido adicionado con gomas. Utilizaron un reómetro en el que realizaron pruebas de barrido de frecuencia de 0.1 a 100 rad/s^{-1} , obteniendo los parámetros viscoelásticos: módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$), encontrando diferencias significativas de estos parámetros viscoelásticos en los tres tipos de masa. Y se concluye que el tipo de proceso de obtención de las diferentes masas de maíz, influye en su comportamiento viscoelástico y que considerando que las masas de maíz nixtamalizado elaboradas mediante el método tradicional presentan un comportamiento viscoelástico característico para la elaboración de productos como tortillas y botanas, se podría establecer que los valores G' , G'' y $\tan \delta$ semejantes a este tipo de masa con favorables para destinarlos al mismo fin.

Se han utilizado pruebas dinámicas para evaluar las propiedades viscoelásticas de masas de harinas de maíz nixtamalizada extruidas elaboradas con gomas y enzimas, a las que se les evaluaron los módulos de almacenamiento (G'), módulos de pérdida (G'') y tangentes del ángulo de fase ($\tan \delta$). Platt-Lucero (2011) determinó que la masa de maíz de harina extruida con enzima xilanasa presentó los parámetros viscoelásticos (G' , G'' , $\tan \delta$) más altos comparados con las masas de harina extruida sin enzimas, además que las tortillas producidas con esta enzima presentaron menor firmeza que las tortillas sin enzima, debido a la acción hidrolítica de los arabinoxilanos. Con el método dinámico fue posible

diferenciar las masas con diferentes aditivos, además de predecir los tratamientos con gomas y enzimas que dieran tortillas con las mejores características texturales.

Reyes *et al.* (2008), realizaron un análisis reológico (pruebas dinámicas) de masa de maíz nixtamalizado para observar y analizar el comportamiento viscoso y elástico del material. El análisis se efectuó realizando un barrido de esfuerzos contra el módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') para establecer la zona lineal (zona donde el material no ha sufrido daño en su estructura), seguido de un barrido de frecuencias (dentro de la zona viscoelástica lineal), donde se analiza el tipo de material, el cual resultó en un gel fuerte, según especificaciones de $G' > G''$.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Objetivos

Objetivo general

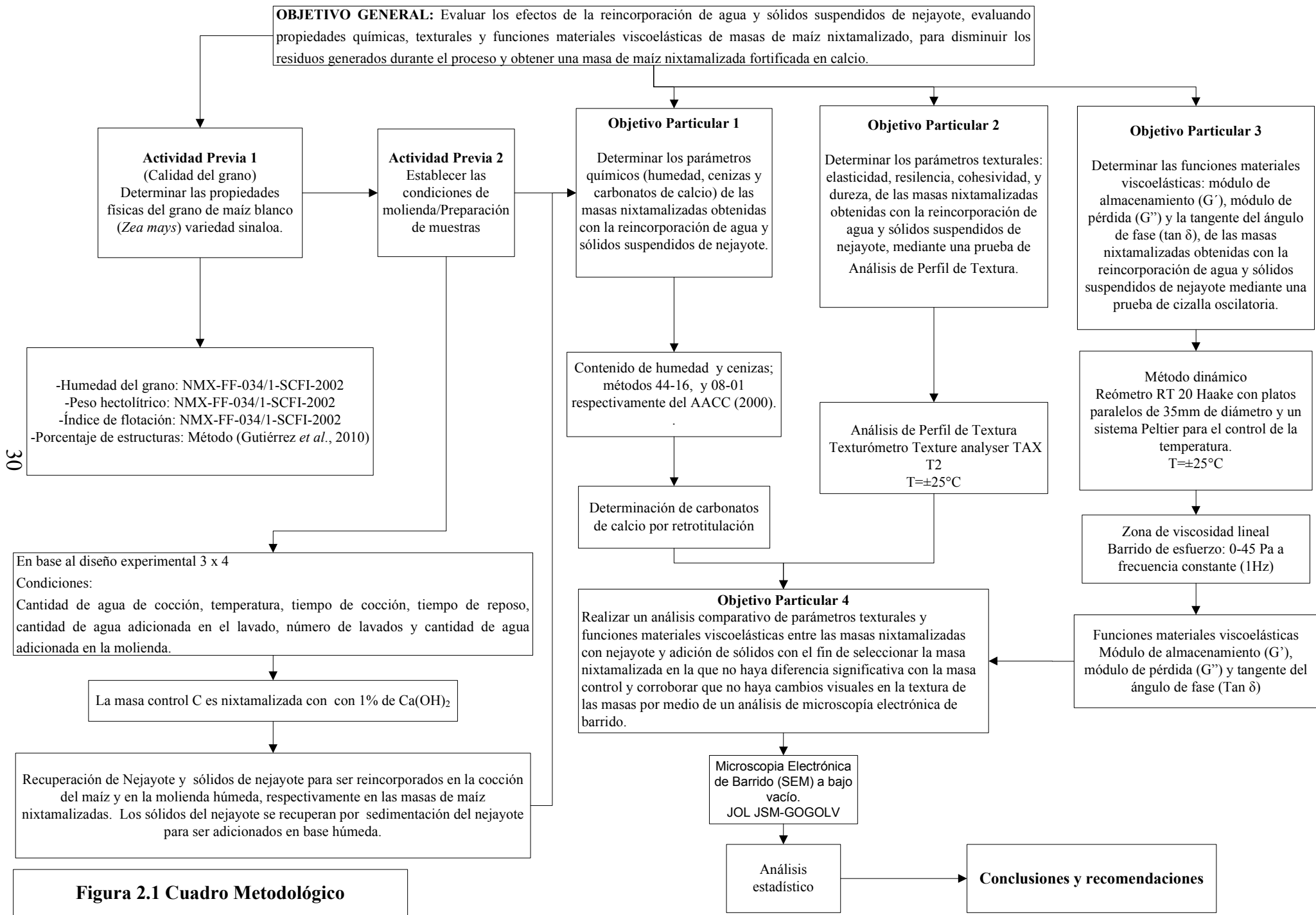
Evaluar los efectos de la reincorporación de agua y sólidos suspendidos de nejayote determinando las propiedades químicas, texturales y las funciones materiales viscoelásticas de masas de maíz nixtamalizado, para disminuir los residuos generados durante el proceso y obtener una masa de maíz nixtamalizada fortificada en calcio.

Objetivos particulares

- ✓ Determinar los parámetros químicos (humedad, cenizas y carbonatos de calcio) de las masas nixtamalizadas obtenidas con la reincorporación de agua y sólidos suspendidos de nejayote.
- ✓ Determinar los parámetros texturales: elasticidad, resilencia, cohesividad, y dureza, de las masas nixtamalizadas obtenidas con la reincorporación de agua y sólidos suspendidos de nejayote, mediante una prueba de Análisis de Perfil de Textura.
- ✓ Determinar las funciones materiales viscoelásticas: módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y la tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$), de las masas nixtamalizadas obtenidas con la reincorporación de agua y sólidos suspendidos de nejayote mediante una prueba de cizalla oscilatoria.
- ✓ Realizar un análisis comparativo de parámetros texturales y funciones materiales viscoelásticas entre las masas nixtamalizadas con nejayote y adición de sólidos con el fin de seleccionar la masa nixtamalizada en la que no hay diferencia significativa con la masa control, corroborando que no haya cambios visuales en la textura de las masas por medio de un análisis de microscopía electrónica de barrido.

2.2 Cuadro metodológico

En la Figura 2.1 se muestra el cuadro metodológico del desarrollo experimental, en donde se resume la metodología de este proyecto y se presentan los objetivos, actividades preliminares y por objetivo, condiciones de trabajo y las técnicas utilizadas durante el trabajo experimental.



2.3 Caracterización de la materia prima

Se utilizó maíz blanco comercial variedad Sinaloa (Figura 2.2) suministrado por el Grupo Contri S.A. de C.V. de Cuautitlán, el cual es uno de los principales distribuidores de maíz para la Industria de la masa y la tortilla (www.contri.com.mx, 2006).



Figura 2.2 Costal de 50 kg de maíz variedad Sinaloa

Fuente: www.contri.com.mx (2006)

Se procedió a realizar una limpieza manual del lote completo de maíz blanco para los tratamientos y su caracterización física. Se desecharon, granos dañados e impurezas contenidas en la muestra hasta la total obtención del grano limpio. Para obtener una muestra representativa maíz se utilizó un homogenizador de granos Seedburo Quality (Figura 2.3).



Figura 2.3 Homogenizador de granos Seedburo Quality

En la parte superior del homogenizador se encuentra un cono central, en el que el grano se distribuyó aleatoriamente en los canales colocados en el contorno interno del homogenizador y que desembocan en dos salidas, en las que se encuentran dos recipientes en los que el grano se deposita. Se tomó una muestra representativa del grano de maíz previamente homogenizado y limpio y se procedió a realizar los análisis correspondientes.

2.3.1 Humedad del grano

Para determinar la humedad de maíz se utilizó un determinador de humedad eléctrico Motomco INS Modelo 919 ES (Figura 2.4).



Figura 2.4 Equipo eléctrico para determinar la humedad Motomco INS Modelo 919 ES

Este determinador de humedad sirve para determinar la cantidad de agua contenida en el grano, determinada con base en la conductividad eléctrica del agua (NMX-FF-034/1-SCFI-2002).

El procedimiento fue el siguiente: Se seleccionó el tipo de grano y posteriormente se vertieron 250g de maíz entero en la tolva de vaciado, previamente homogenizado, y se oprimió el botón para que la muestra bajara. Se tomó la lectura del porcentaje de humedad directamente en la pantalla del equipo. El contenido de humedad fue el porcentaje promedio de tres réplicas.

2.3.2 Peso hectolítrico (densidad aparente)

Para la medición del peso hectolítrico se utilizó una balanza de peso específica marca OHAUS (Figura 2.5).



Figura 2.5 Balanza específica marca OHAUS para determinar peso hectolítrico

La balanza se equilibró y posteriormente se colocó la muestra de maíz en el embudo superior de la balanza, colocando el recipiente de 1 L por debajo y se dejó caer libremente el grano al recipiente, rasando sin apretar el grano con tres movimientos en zigzag. Se colocó el recipiente al fiel de la balanza y se tomó la lectura. El peso del volumen del grano se multiplicó por 100 para reportar el resultado en kg/hL. El peso hectolítrico fue el porcentaje promedio de tres réplicas.

2.3.3 Dureza (método indirecto mediante el índice de flotación)

Para determinar la dureza del maíz, se utilizó el método propuesto por Salinas *et al.* (1992) para calcular el índice de flotación. El procedimiento se describe a continuación:

Se empleó una solución de nitrato de sodio, ajustada a una concentración de 41% a una densidad de 1.250 g/mL (+/- 0.001 g/mL). Empleando un volumen de 300 mL de solución, contenidos en un vaso de 600 mL. Se tomaron 100 granos limpios (libres de impurezas), y se colocaron en la solución de nitrato de sodio previamente preparada, separando los granos uno de otro por medio de un agitador de vidrio, se agitó y se esperó

un minuto para tomar la lectura. El número de granos que ascendieron a la superficie fue el porcentaje del índice de flotación. El índice de flotación fue el promedio de tres réplicas.

2.3.4 Porcentaje de las estructuras del grano de maíz

El porcentaje de pericarpio, endospermo, germen y cofia se determinó de acuerdo a la metodología descrita por Gutiérrez-Urbe *et al.* (2010), en donde 50g de maíz fueron diseccionados manualmente después de ser hidratados 2 minutos en 100 mL de agua, posteriormente se secaron en un horno a 60°C y se pesaron para obtener los porcentajes de las estructuras del grano de maíz.

2.4 Nixtamalización

El diagrama de proceso de elaboración de las masas de maíz nixtamalizadas y la identificación de sus puntos críticos se muestra en la Figura 2.6.

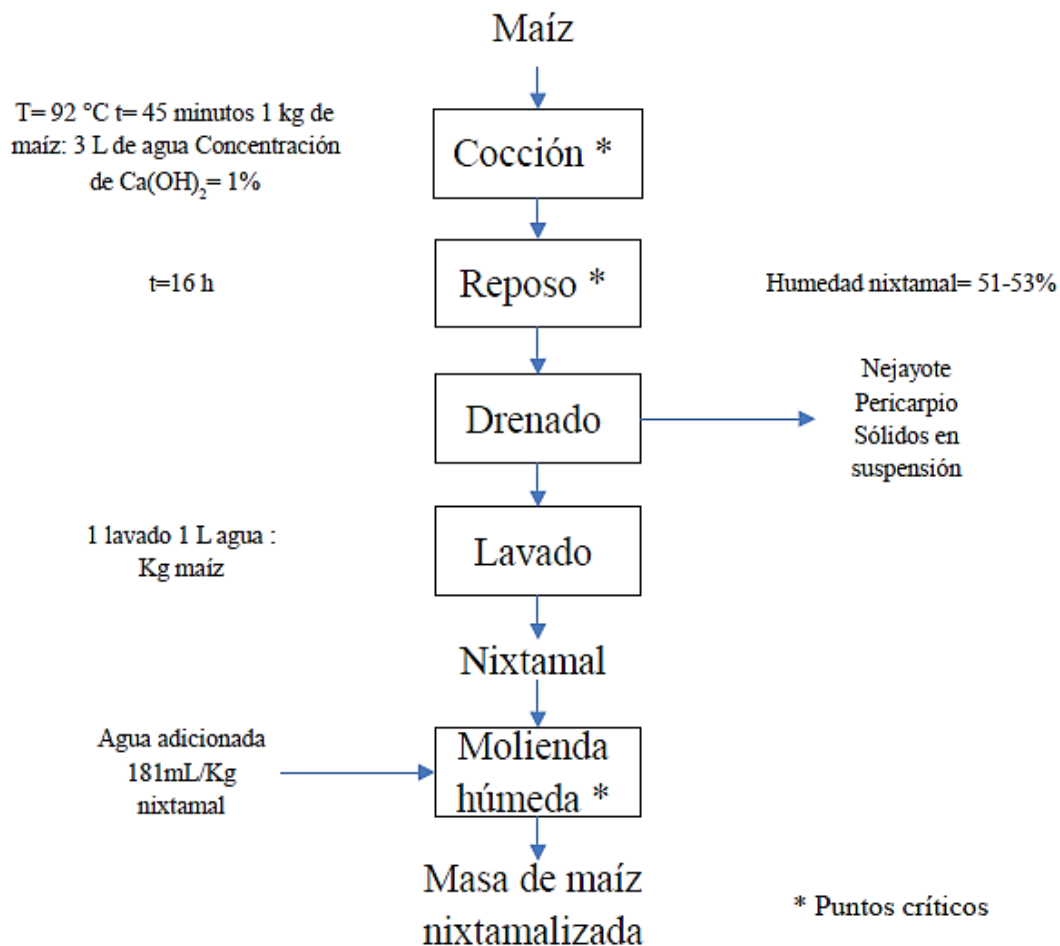


Figura 2.6 Diagrama de bloques del proceso de nixtamalización

En todos los ensayos se fijó la cantidad de agua de cocción, temperatura, tiempo de cocción, tiempo de reposo, cantidad de agua adicionada en el lavado, número de lavados, porcentaje de calcio y cantidad de agua adicionada en la molienda. La metodología empleada fue la de Gutiérrez-Uribe *et al.* (2010).

A continuación se presenta la descripción del diagrama de bloques del proceso de nixtamalización para la elaboración de las masas de maíz nixtamalizadas:

Cocción

Para el tiempo de cocción se tomó como referencia 40 minutos, tiempo marcado por la norma la NMX-FF-034/1-SCFI-2002; sin embargo, cuando se realizó la molienda se observó que la masa no era moldeable ni tenía la cohesividad adecuada. Además con esta masa no se podían preparar las muestras para la medición de textura y parámetros reológicos. Quintanar *et al.* (2009) mostraron que a tiempos de cocción mayores a 50 minutos, existen cambios en la forma de los cuerpos de proteínas de forma irregular a redonda en las muestras nixtamalizadas. Así mismo determinaron que el tiempo máximo de cocción para las masas es 50 minutos. Por arriba de este tiempo las masas comienzan a tener rigidez, con un incremento en G' , posiblemente debido a una mayor gelatinización del almidón. Como consecuencia el tiempo de cocción se modificó a 45 minutos.

Cada muestra se preparó cocinando 500 g de maíz con hidróxido de calcio (grado alimenticio, Fermont, Monterrey, NL, México) al 1% en relación al peso del maíz, manteniendo una temperatura de 91 °C por 45 minutos.

Reposo

Las muestras se reposaron en envases de plástico con tapa a temperatura ambiente por 16 horas (Gutiérrez-Uribe *et al.*, 2010). Después del reposo se separó el nejayote del nixtamal.

Lavado

El lavado que se llevó a cabo después del reposo y se realizó de la siguiente manera: Se colocaron los granos de maíz en un colador de plástico para recuperar el nejayote. Posteriormente se colocaron los granos de maíz en un recipiente y se agregó 1L de agua por

kg de maíz, realizando únicamente un solo lavado. En este lavado se recuperaron los sólidos y se incorporaron con el nejayote.

Se volvieron a escurrir los granos de maíz para retirar el líquido sobrenadante del lavado y se determinó la humedad del grano nixtamalizado para conocer la cantidad de agua absorbida durante la cocción y el reposo.

Molienda

La molienda del maíz nixtamalizado se realizó en un molino manual marca “Nixtamatic”. La molienda se estandarizó ajustando los discos al máximo para la obtención de una masa fina pasando el grano 2 veces por el molino (Figura 2.7), y se comparó visualmente con una masa comercial. La masa obtenida fue mantenida dentro de bolsas herméticas para evitar la pérdida de humedad.

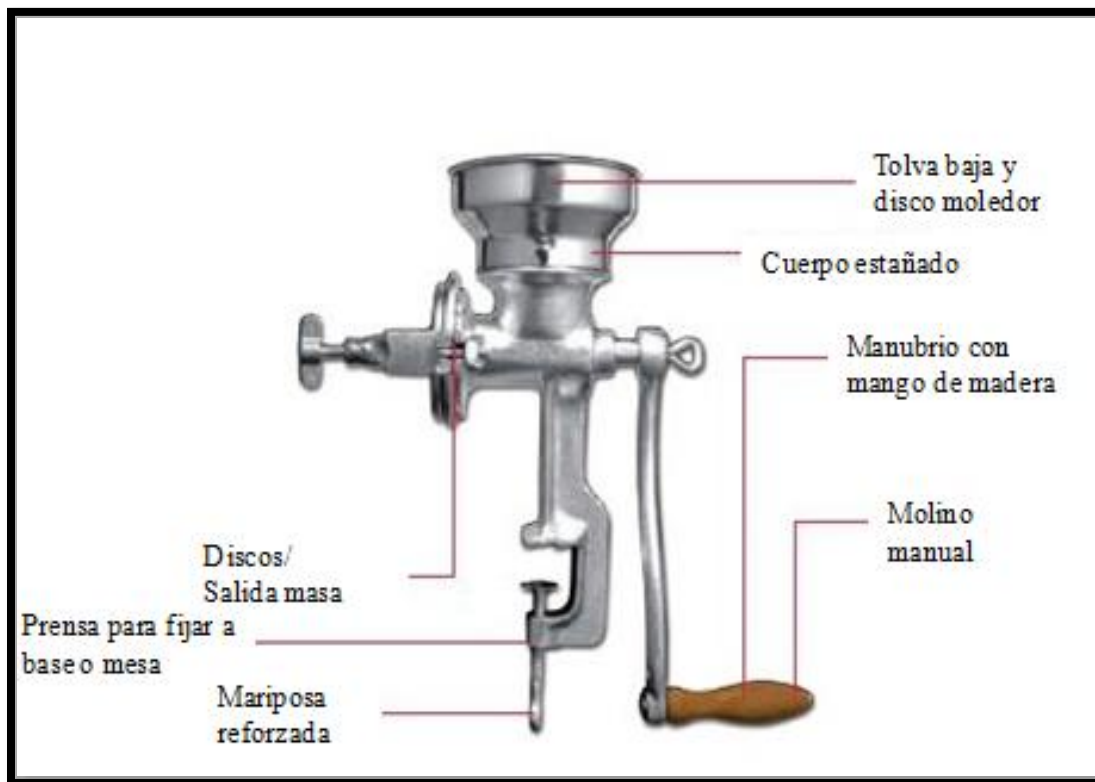


Figura 2.7 Molino manual marca “Nixtamatic”

2.5 Masas de maíz nixtamalizadas con nejayote y adicionadas con sólidos

Las masas nixtamalizadas con nejayote y adicionadas con sólidos se elaboraron tomando como referencia el diseño factorial mixto 4 x 3, que se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Diseño factorial mixto

| | 1. Sin S | 2. 10% S | 3. 20% S | 4. 30% S |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1.N | T ₁₁ | T ₁₂ | T ₁₃ | T ₁₄ |
| 2.N 2:1 (Nejayote/agua) | T ₂₁ | T ₂₂ | T ₂₃ | T ₂₄ |
| 3. N 1:1 (Nejayote/agua) | T ₃₁ | T ₃₂ | T ₃₃ | T ₃₄ |

S= Sólidos de nejayote N= Nejayote T= Tratamientos

2.5.1 Obtención de sólidos de nejayote

Los sólidos de nejayote se separaron del agua por decantación, concentrándolos hasta 87% de humedad. Posteriormente se agregaron al nixtamal en las siguientes proporciones: 1:0.10, 1:0.20 y 1:0.30 en porcentaje (Nixtamal/sólidos nejayote) en base húmeda.

2.5.2 Obtención de nejayote para cocción

Al nejayote empleado para la cocción del grano de maíz se adicionó agua a diferentes proporciones: 2:1 y 1:1 (Nejayote/agua).

2.5.3 Preparación de las muestras

Las diferentes muestras testigos fueron nixtamalizadas de la siguiente forma: Masa control nixtamalizada (C), masas nixtamalizadas con sólidos de nejayote (S) adicionados en la molienda 10%, 20%, y 30% en base húmeda.

Las variaciones del primer bloque fueron: masa nixtamalizada con nejayote (N), masas nixtamalizadas con nejayote diluido en relación ND 2:1 y ND 1:1 nejayote/agua. El segundo bloque tuvo como variaciones, masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con sólidos a diferentes porcentajes (N 0%, NS 10%, NS 20% y NS 30%).

2.5 Evaluación de propiedades químicas

Se realizó un análisis químico de humedad y cenizas de las masas de maíz nixtamalizadas siguiendo los métodos oficiales de la American Association of Cereal Chemists (AACC).

2.5.1 Humedad

El contenido de humedad se determinó en estufa de aire (Figura 2.8), el cual se basa en la pérdida de peso de la muestra por evaporación del agua. La determinación se basó en el método 925.10 del AOAC (1990).



**Figura 2.8 Estufa para determinar humedad
Lindberg Blue Modelo: TS7182W87**

2.5.2 Cenizas

El método para la determinación de cenizas se basa en la incineración para destruir la materia orgánica por medio de una calcinación de la muestra a 550 °C quedando las cenizas o residuo inorgánico. El contenido de cenizas se determinó en la mufla (Figura 2.9) Thermolyne® modelo Z509744 siguiendo el método 08-01 del AACC (2000).

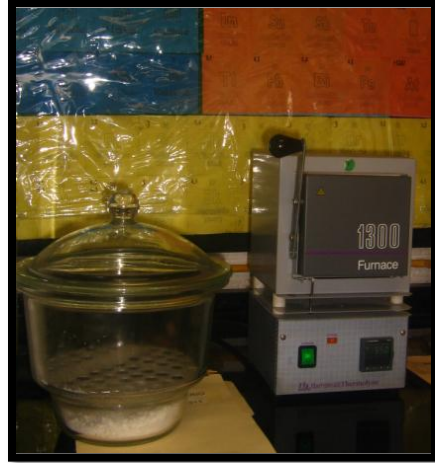


Figura 2.9 Mufla para determinar cenizas

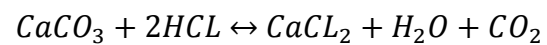
2.5.3 Carbonatos de calcio

El porcentaje de CaCO_3 se determinó por medio de una retrotitulación (Figura 2.10).

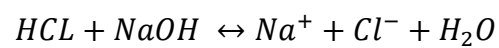


Figura 2.10 Retrotitulación

Reacción de retrotitulación:



El exceso de HCL se titula con NAOH:



El método consistió en pesar 500 mg de muestra de masa de maíz nixtamalizada seca y pulverizada en un matraz Erlenmeyer. Con una pipeta volumétrica se agregaron 10 mL de HCL 1N, se agitaron los matraces por 5 minutos. Se calentaron los matraces hasta que la solución comenzó a hervir ($T=48\text{ }^{\circ}\text{C}$); se enfriaron los matraces con agua y se adicionaron 3 gotas de indicador de fenolftaleína al matraz. Se llenó una bureta con la solución titulante de NaOH 1N y se agregó lentamente a cada matraz con agitación constante. Se adicionó fenolftaleína hasta el vire de la solución incolora a rosa hasta que esta coloración permaneció al menos 30 segundos.

2.6 Evaluación de propiedades texturales

Para las pruebas de perfil de textura se utilizaron muestras cilíndricas preparadas como sigue: en un molde de acrílico de forma cilíndrica con dimensiones internas de 35 mm de diámetro y 30 mm de altura se colocaron 50 g de masa, con la que manualmente se formó un cilindro en el molde, presionando para evitar espacios de aire. El exceso de masa de la parte superior del molde se retiró con una espátula de acero inoxidable. Se sacó el cilindro de masa del molde (Figura 2.11) y se colocó dentro de bolsas de polietileno con cierre hermético. Donde se dejó reposar a temperatura ambiente durante 15 min para permitir que se relaje después de la manipulación.

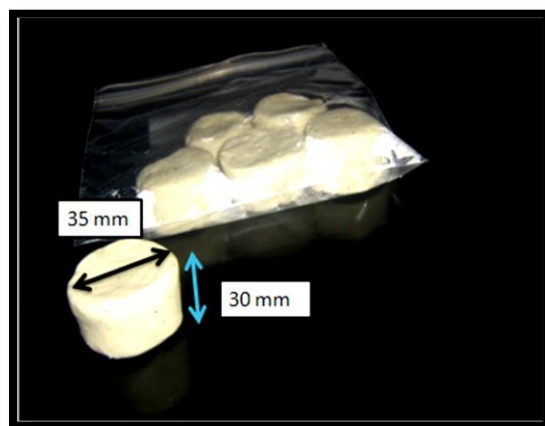


Figura 2.11 Muestras cilíndricas de masa para perfil de textura

El análisis de perfil de textura se realizó en un Texturómetro LLOYD TA 500 (Figura 2.12) con celda de carga de 50 kg utilizando como dispositivo una placa de acero inoxidable de 4.5 cm de diámetro, comprimiendo una distancia de 6 mm a una velocidad de compresión

de 1 mm/s y con un tiempo de espera entre el primero y segundo ciclo de compresión, de 5 segundos. Las pruebas se efectuaron por triplicado a una temperatura de 25 ± 1 °C.



Figura 2.12 Texturómetro LLOYD TA 500

Del análisis de perfil de textura se obtuvo la curva fuerza-tiempo (Figura 2.13).

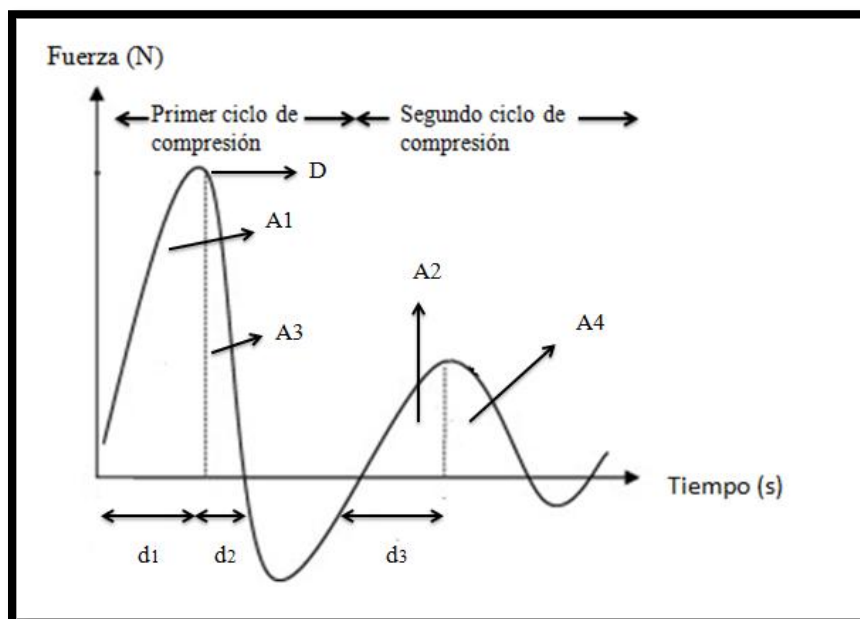


Figura 2.13 Curva generalizada de Análisis de Perfil de Textura (TPA) lograda en texturómetro. A=área d=distancia

Fuente: Valencia et al., 2007

De la curva fuerza-tiempo (Figura 2.13), se calcularon los parámetros que se definen a continuación (Gasca y Casas, 2007):

- ✓ Dureza (D): es la fuerza máxima en el primer ciclo de compresión y se define como la fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada.
- ✓ Cohesividad (C): se define como la resistencia de los enlaces internos que forman el cuerpo del material. Se calcula como el área total bajo la curva del segundo ciclo de compresión (A_2+A_4) sobre el área total bajo la curva del primer ciclo (A_1+A_3).

$$C = \frac{A_2 + A_4}{A_1 + A_3} \quad \text{Ecuación 1}$$

- ✓ Resilencia (R): Es la capacidad de un cuerpo de almacenar energía elásticamente y se calcula con el área bajo la curva en la descompresión del primer ciclo (A_3) sobre el área bajo la curva en la compresión del mismo (A_1).

$$R = \frac{A_3}{A_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

- ✓ Índice de recuperación elástica instantánea (IREI): Es un índice de las características ideales de un material (recuperación instantánea) en relación con la distancia comprimida. Se calcula como la distancia recuperada por la muestra durante la descompresión del primer ciclo (d_2) sobre la distancia comprimida (d_1).

$$IREI = \frac{d_2}{d_1} \quad \text{Ecuación 3}$$

- ✓ Índice de recuperación elástica total (IRET): es un índice de recuperación elástica total del material, incluyendo la recuperación elástica ideal o instantánea y la recuperación retardada por el comportamiento viscoso. Se calcula como la distancia recuperada por la muestra en el tiempo transcurrido desde el término de la compresión en el primer ciclo (d_2) y el inicio del segundo en relación con la distancia comprimida (d_3).

$$IRET = \frac{d_2}{d_3} \quad \text{Ecuación 4}$$

2.7 Evaluación de propiedades viscoelásticas

Para realizar el análisis, se utilizó un reómetro marca RT 20 Haake y un sistema Peltier para el control de temperatura (Figura 2.14 a). El procedimiento consistió en colocar una muestra de masa con una espátula plástica entre las placas del reómetro (Figura 2.14 b), se utilizó una placa rugosa de 35 mm de diámetro, con una separación de platos de 1 mm. Posteriormente se retiraron los sobrantes de muestra utilizando la espátula plástica y se procedió a cubrir con aceite mineral la parte expuesta al ambiente para evitar la pérdida de humedad. La muestra se dejó en reposo durante 15 minutos a fin de que se estabilizara (Magaña *et al.*, 2009).

2.7.1 Determinación de la zona de viscoelasticidad lineal

Se realizó un barrido de esfuerzo para establecer la zona de viscoelasticidad lineal de las masas de maíz nixtamalizadas con nejayote y sólidos de nejayote en un intervalo de 0 a 500 Pa a 25 °C, en donde la relación de la fuerza aplicada y la deformación resultante es sólo una función del tiempo y no de la magnitud de la fuerza aplicada.

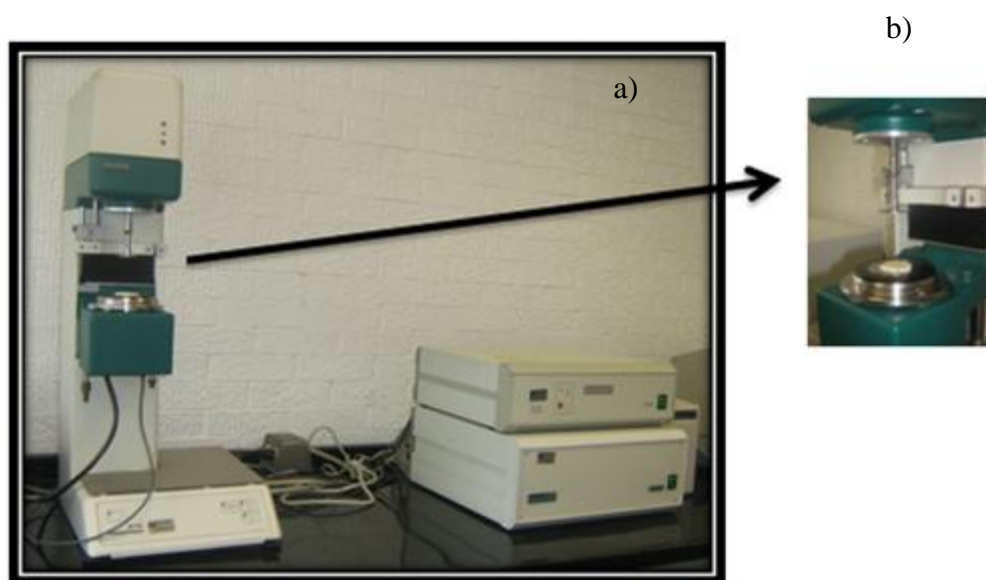
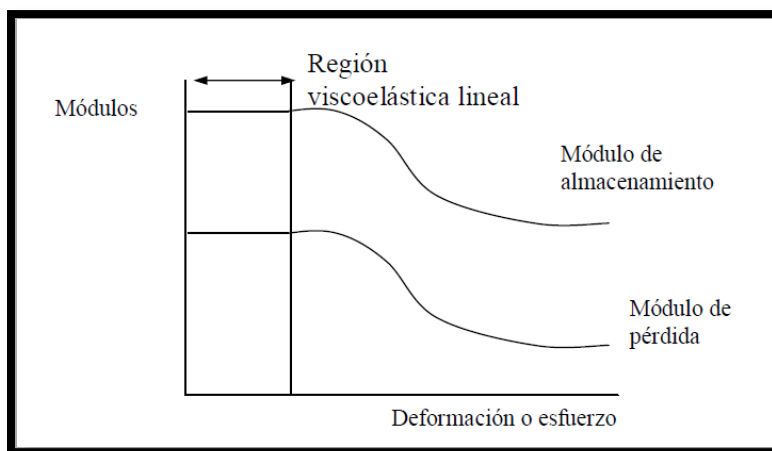


Figura 2.14 a) Reómetro RT 20 Haake con sistema Peltier TC 80 b) Muestra de masa

En la Figura 2.15 se muestra un barrido de deformación o esfuerzo mostrando la región viscoelástica lineal.



(Steffe, 1992)

Figura 2.15 Respuesta típica a un barrido de esfuerzo mostrando la región viscoelástica lineal.

2.7.2 Determinación de parámetros viscoelásticos

Una vez establecida la zona de viscoelasticidad lineal, las pruebas de barrido de frecuencia se realizaron a un esfuerzo donde se encontrara un comportamiento lineal, de acuerdo a los resultados del barrido de esfuerzo a una temperatura de 25 °C desde 0.1 hasta 40 Hz.

Los parámetros reológicos obtenidos fueron: módulo de almacenamiento G' (Pa), módulo de pérdida G'' (Pa), y la tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$).

2.8 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados estadísticamente por ANOVA de dos vías con una $p < 0.05$ y se aplicó una prueba de comparación de medias (Tukey). Se empleó el software estadístico Minitab® Statistical Software, versión 15 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

2.9 Microscopía electrónica de barrido

Para corroborar que no hubo cambios visuales en las texturas de las masas nixtamalizadas, se llevó a cabo un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) a bajo vacío (JEOL JSM-GOGOLV) a la masa control (C) y a una muestra seleccionada con los parámetros texturales y las funciones materiales viscoelásticas más parecidas. Las muestras fueron analizadas con la masa fresca, la cual fue colocada en una porta muestras de bronce y

fijadas con adhesivo de carbón (Figura 2.16 a). Las condiciones del análisis en la cámara fueron 20 KV de voltaje de aceleración de electrones (Figura 2.16 b).

a)



b)



Figura 2.16 a) Preparación de las muestras b) Microscopio Electrónico de Barrido

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la materia prima

La caracterización del maíz blanco tuvo como finalidad evaluar la calidad del maíz para la elaboración de la masa de maíz nixtamalizado.

La calidad de la materia prima es importante, ya que las características de la masa de maíz nixtamalizada depende de factores como la variedad del grano, el manejo, y almacenamiento por lo que es importante conocer características importantes como la dureza y porcentaje de humedad del grano de maíz (Salinas *et al.*, 1992). Si se desea la estandarización del proceso de nixtamalización y la obtención de productos de buena calidad, es conveniente manejar materias primas de calidad uniforme y adecuada. La norma mexicana NMX-FF-024/1-SCFI-2002 establece las características de calidad comercial que debe reunir el maíz blanco de consumo humano, para la elaboración de tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados de las propiedades físicas del maíz blanco variedad Sinaloa.

Tabla 3.1 Propiedades físicas del maíz blanco variedad Sinaloa
Los valores representan el promedio \pm desviación estándar, (n=3)

| Características | Maíz blanco variedad Sinaloa | Parámetro de referencia NMX-FF-034/1-SCFI-2002 |
|------------------------------|------------------------------|--|
| Humedad (%) | 11.70 \pm 0.05 | 14 |
| Peso hectolítrico (kg/hL) | 75.30 \pm 0.57 | >74 |
| Dureza: Índice flotación (%) | 23 \pm 1.20 | 13-37 (Duro) |
| Textura: | | |
| Cofia (%) | 1.34 \pm 0.91 | ---- |
| Pericarpio (%) | 4.47 \pm 0.86 | ---- |
| Germen (%) | 11.61 \pm 1.02 | ---- |
| Endospermo (%) | 82.89 \pm 0.90 | ---- |

En la Tabla 3.1, se observa que los granos de maíz tuvieron una humedad promedio de 11.7%, que está en el rango establecido por la norma mexicana NMX-FF-024/1-SCFI-2002 que indica una humedad máxima de 14% para la conservación y almacenamiento del maíz.

La norma mexicana NMX-FF-024/1-SCFI-2002 considera que el grano deberá tener una densidad mínima de 74 kg/hL, y el maíz empleado tuvo en promedio un peso hectolítrico de 75.3 kg. Respecto a la dureza, la cual fue evaluada indirectamente por el índice de flotación, presentó 20%, valor que está dentro de la norma que va de 13-37% para considerarlo como un grano duro.

La dureza del endospermo determina en gran parte la velocidad de penetración del agua durante el cocimiento (Almeida-Domínguez *et al.*, 1996). Serna-Saldivar *et al.* (1990) recomiendan que un maíz adecuado para el proceso de nixtamalización debe contar con endospermo de semiduro a duro porque representa menores pérdidas de materia seca durante la nixtamalización. Con los datos obtenidos, el maíz variedad Sinaloa fue adecuado para llevar a cabo la nixtamalización.

3.2 Contenido de humedad de las masas nixtamalizadas

Los resultados que se obtuvieron de porcentaje de humedad en todas las masas de maíz nixtamalizado no presentaron diferencias estadísticas cuando fueron comparadas. El contenido de humedad de las masas fluctuó entre 57.6 y $58 \pm 0.26\%$.

La humedad de la masa es un factor importante en la elaboración de la tortilla, de acuerdo con Arámbula *et al* (2001) en una masa de maíz (*Zea mays* L.) de buena calidad para producir tortillas, la humedad debe oscilar entre 50 y 58%.

3.3 Cenizas de las masas nixtamalizadas

La Figura 3.1 se reporta el porcentaje promedio del contenido de cenizas de las masas nixtamalizadas con diferentes porcentajes de sólidos de nejayote, con nejayote a diferentes diluciones y con nejayote a diferentes diluciones y adicionadas con sólidos de nejayote.

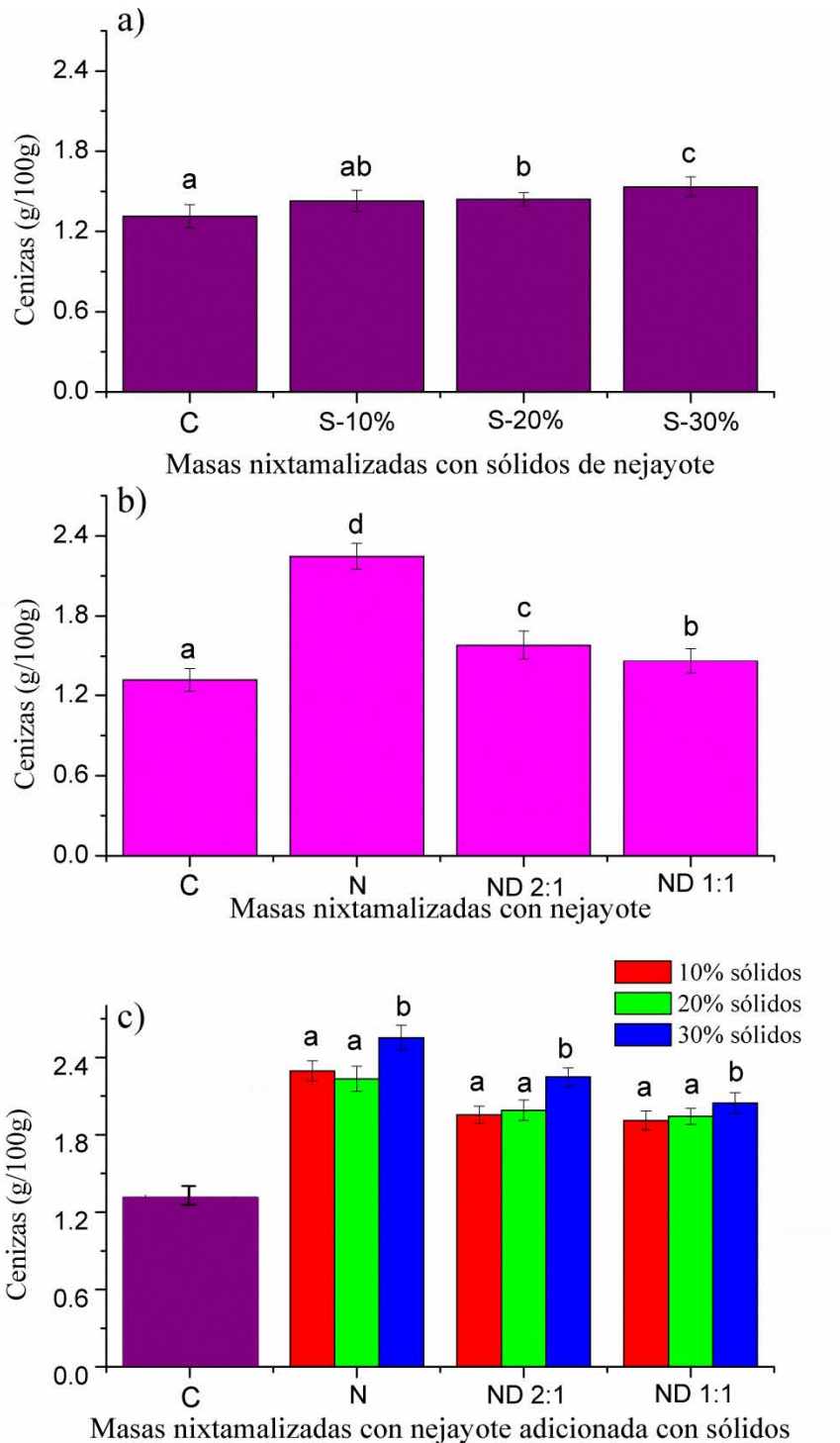


Figura 3.1 Porcentaje promedio del contenido de cenizas de masas a) Masas nixtamalizadas con diferentes porcentajes de sólidos b) Masas nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y c) Masas nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y adicionadas con sólidos de nejayote

Medias con letras diferentes, muestran diferencia significativa $p < 0.05$

En la Figura 3.1 (a), que representa el contenido de cenizas de masas nixtamalizadas con diferentes contenidos de sólidos de nejayote, se observa que el contenido de cenizas en las masas aumentó a medida que el porcentaje de sólidos contenidos en las masas de maíz nixtamalizado fue mayor, presentándose diferencia significativa entre las masas con 30% de sólidos, con el resto de las masas, siendo ésta la que tuvo mayor contenido de cenizas. También se puede observar que no hubo diferencia significativa entre la masa C y la masa con 10% de sólidos, pero se observa una diferencia con 20% y 30% de sólidos. El contenido de cenizas en las masas nixtamalizadas con las diferentes diluciones de nejayote, fue significativamente diferente entre todas las masas, siendo la masa C la que mostró el menor contenido de cenizas, seguida de la masa ND 1:1, ND 2:1 y N, siendo ésta última la que tuvo mayor cantidad de cenizas (Figura 3.1 b).

En la Figura 3.1 (c), se muestra el contenido de cenizas de masas nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones adicionadas de sólidos de nejayote. Claramente se observa que el contenido de cenizas de las masas control C fueron significativamente menores a los contenidos de cenizas de las masas NS, NDS 2:1 y NDS 1:1. En el caso de la masa NS 30% de sólidos fue la que significativamente presentó mayor contenido de cenizas, respecto al total de masas analizadas. Este aumento en cenizas podría ser originado por la presencia de calcio proveniente del nejayote, lo cual significaría que el mayor contenido de calcio es aportado principalmente por el agua del nejayote, como se observa en las Figuras 3.1 (a) y 3.2 (b).

3.4 Carbonatos de calcio de las masas nixtamalizadas

En la Figura 3.2 se reporta el contenido de carbonato de calcio de masas nixtamalizadas a diferentes contenidos de sólidos, con nejayote a diferentes diluciones y con nejayote a diferentes diluciones y con sólidos de nejayote.

La Figura 3.2 (a) representa el contenido de carbonato de calcio de masas nixtamalizadas a diferentes porcentajes de sólidos de nejayote. En esta figura se observa, que el contenido de carbonato de calcio incrementó a medida de que el porcentaje de sólidos fue mayor. El contenido de carbonato de calcio es significativamente mayor en la masa con sólidos S 30% respecto a las masas C, masa S-10% y S-20%.

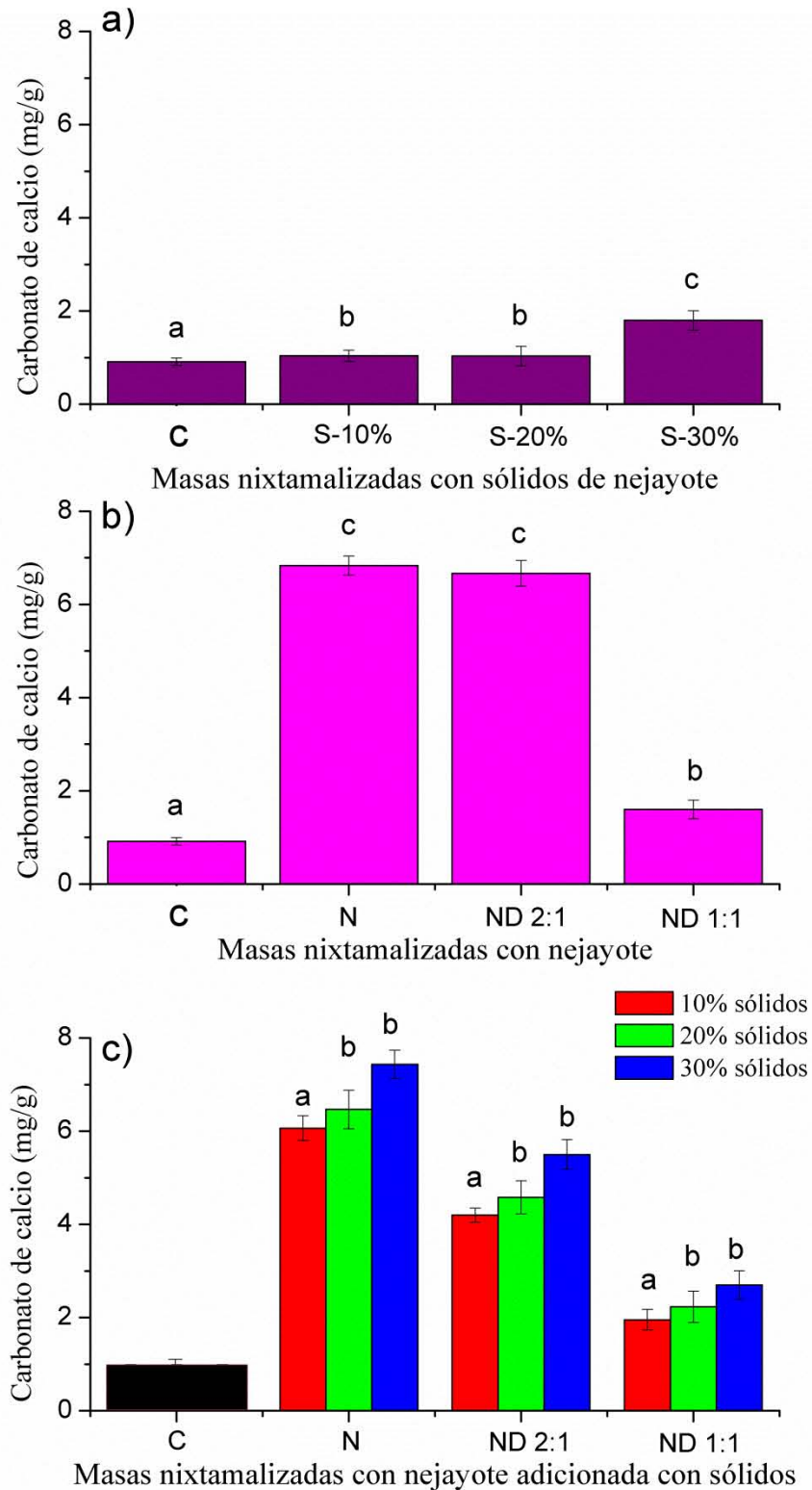


Figura 3.2 Contenido de carbonato de calcio de masas a) Nixtamalizadas a diferentes contenidos de sólidos b) Nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y c) Nixtamalizadas con nejayote a diferentes diluciones y adicionadas con sólidos de nejayote
Medias con letras diferentes, muestran diferencia significativa $p < 0.05$

El contenido de carbonato de calcio fue mayor en las masas nixtamalizadas con nejayote sin diluir y nejayote diluido 2:1, los cuales no mostraron diferencia significativa, sin embargo fueron significativamente diferentes que las masas nixtamalizadas con nejayote diluido 1:1 y la masa control, siendo ésta última la que presentó menor cantidad de carbonato de calcio. Figura 3.2 (b).

En la Figura 3.2 (c) se muestra el contenido de carbonato de calcio de masas nixtamalizadas adicionadas con cada uno de los porcentajes de sólidos de nejayote, en las cuales el contenido de carbonato de calcio fue significativamente mayor que en el control.

Evidentemente se observa en la Figura 3.2 que en las masas N, NDS 2:1 y NDS 1:1 adicionadas con 20% y 30% presentan un aumento significativo del contenido de carbonato de calcio respecto a las masas adicionadas con 10% de sólidos. Sin embargo, entre las masas adicionadas al 20% y 30% de sólidos de nejayote no hubo diferencia significativa. En otro sentido, cuando se mantiene constante el porcentaje de sólidos adicionados y se modifica la concentración de nejayote, el contenido de carbonato de calcio en las masas NS son significativamente mayores que las masas NDS 2:1 y NDS 1:1, siendo ésta última la que presenta menor contenido en carbonato de calcio.

Los resultados obtenidos muestran que el contenido de carbonato de calcio fue mayor en las masas nixtamalizadas con nejayote más concentrado (Figura 3.2b). Este hecho implica que el mayor contenido de carbonato de calcio está en el líquido del nejayote y no en los sólidos. Este resultados concuerdan con los datos reportados por Valderrama-Bravo *et al.* (2012), quienes realizaron filtraciones de nejayote y encontraron disminución de la dureza (evaluada como CaCO_3) en los filtrados.

Maki *et al.* (2002) mencionan que la absorción de calcio disminuye con la edad debido a factores fisiológicos. Nordin (1997) reporta que durante la menopausia existe aumento en la excreción de calcio, por lo cual debe incrementarse los requerimientos de este mineral en esta etapa, para evitar riesgos de fractura por una disminución en la densidad del hueso. Paredes-López *et al.* (2006) recomiendan consumir productos nixtamalizados para reducir y prevenir problemas asociados a la deficiencia del calcio. Sin embargo en el mercado existen diversos suplementos de calcio, el más empleado es el CaCO_3 , que combinado con

Vitamina D es esencial para una dieta óptima de absorción de calcio y mineralización del hueso (Eastell, 1998., Heaney, 2000). Consecuentemente, consumir tortillas con altos valores de CaCO₃ puede ser un suplemento de calcio adecuado, además el emplear agua de nejayote disminuye la contaminación al medio ambiente y se ahorra una cantidad considerable de agua.

3.5 Propiedades texturales

En la Tabla 3.2 se muestran los valores promedio de los parámetros texturales obtenidos en la prueba análisis de perfil de textura de las masas de maíz nixtamalizadas únicamente con sólidos de nejayote.

Tabla 3.2 Propiedades texturales de la masa nixtamalizada adicionadas con sólidos de nejayote bajo la prueba de análisis de perfil de textura. Valores promedio \pm desviación estándar.

Los valores promedio con superíndices diferentes dentro de columna son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$, $n=3$ repeticiones.

| Muestra | Dureza (N) | Cohesividad | Resiliencia | Índice Elástico | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | | | Instantáneo | Total |
| Masas nixtamalizadas con sólidos de nejayote | | | | | |
| C | 0.520 ^a \pm 0.013 | 0.353 ^a \pm 0.008 | 0.166 ^a \pm 0.004 | 0.242 ^a \pm 0.001 | 0.406 ^a \pm 0.004 |
| 10% sólidos | 0.743 ^b \pm 0.006 | 0.328 ^a \pm 0.007 | 0.164 ^a \pm 0.004 | 0.246 ^a \pm 0.002 | 0.350 ^b \pm 0.008 |
| 20% sólidos | 0.788 ^b \pm 0.002 | 0.288 ^a \pm 0.003 | 0.167 ^a \pm 0.003 | 0.226 ^a \pm 0.002 | 0.397 ^b \pm 0.002 |
| 30% sólidos | 0.858 ^c \pm 0.002 | 0.347 ^a \pm 0.004 | 0.163 ^a \pm 0.017 | 0.257 ^a \pm 0.002 | 0.446 ^c \pm 0.003 |

Como se observa en la Tabla 3.2, no hay diferencias significativas entre los diferentes porcentajes de sólidos adicionados a la molienda en cuanto a cohesividad, resiliencia e índice elástico instantáneo, pero si se observa diferencia en cuanto a la dureza e índice elástico total, respecto a la masa control (C), en las cuales aumenta al adicionar mayor cantidad de sólidos.

En los resultados de la Tabla 3.2 se observa que la elasticidad de la masa control (0.406 \pm 0.004) aumentó (0.446 \pm 0.003). Niño-Medina *et al* (2009) mencionan que los sólidos de nejayote tiene alto contenido de polisacáridos no celulósicos, (2.28% de sólidos secos que incluyen parte del pericarpio, hemicelulosa, carbohidratos, proteínas endospermo, pequeñas

parte del germen), los cuales son importantes por sus propiedades funcionales en alimentos como espesantes, estabilizantes, emulsificantes y formadores de películas o geles. Este tipo de polisacáridos presentes en el nejayote pudieran ayudar a aumentar elasticidad en las masas de maíz nixtamalizadas con nejayote.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores promedio de las masas de maíz nixtamalizadas con nejayote sin sólidos.

Tabla 3.3 Propiedades texturales de la masa nixtamalizada con nejayote bajo la prueba de análisis de perfil de textura. Valores promedio \pm desviación estándar.

Los valores promedio con superíndices diferentes dentro de columna son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$, $n=3$ repeticiones.

| Muestra | Dureza (N) | Cohesividad | Resiliencia | Índice Elástico | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | | | Instantáneo | Total |
| C | 0.520 ^a \pm 0.013 | 0.353 ^a \pm 0.008 | 0.166 ^a \pm 0.004 | 0.242 ^a \pm 0.001 | 0.406 ^a \pm 0.004 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote (Sin sólidos) | | | | | |
| N | 2.012 ^b \pm 0.025 | 0.229 ^b \pm 0.005 | 0.147 ^b \pm 0.008 | 0.210 ^{ab} \pm 0.025 | 0.334 ^b \pm 0.005 |
| ND 2:1 | 1.207 ^c \pm 0.003 | 0.240 ^c \pm 0.011 | 0.146 ^b \pm 0.006 | 0.178 ^b \pm 0.003 | 0.344 ^c \pm 0.005 |
| ND 1:1 | 1.034 ^d \pm 0.006 | 0.291 ^d \pm 0.001 | 0.140 ^b \pm 0.006 | 0.227 ^a \pm 0.006 | 0.369 ^b \pm 0.007 |

En la Tabla 3.3 se observa diferencia significativa en todos los parámetros. En estos parámetros la dureza aumento y la cohesividad e índice elástico disminuyó, respecto a la masa control. Claramente se muestra que el agua de nejayote origina un aumento de carbonato de calcio en las masas (ver Figura 3.2b) que le confiere una mayor rigidez. Así mismo, se observa que al nixtamalizar con nejayote (ND 1:1) la dureza disminuye y la cohesividad aumenta, al igual que el índice elástico. En otro sentido, dado que la cohesividad representa el punto límite hasta el cual puede deformarse el material antes de romperse, al ser menos cohesivo las partículas están menos unidas, por lo que la desintegración y el desmoronamiento aumenta, originando una masa que no puede moldearse. Con los resultados obtenidos nixtamalizar con Nejayote y ND 2:1, no es conveniente dado que todos los parámetros texturales se modifican, lo cual puede originar una masa no apta para ser procesada.

En la Tabla 3.4 se observan los valores promedio de los parámetros texturales de las masas de maíz nixtamalizadas con sólidos y nejayote.

Tabla 3.4 Propiedades texturales de la masa nixtamalizada adicionada con sólidos y nejayote bajo la prueba de análisis de perfil de textura. Valores promedio \pm desviación estándar.

Los valores promedio con superíndices diferentes dentro de columna son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$, $n=3$ repeticiones.

| Muestra | Dureza (N) | Cohesividad | Resiliencia | Índice Elástico | |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | | Instantáneo | Total |
| C | 0.520 ^a \pm 0.013 | 0.353 ^a \pm 0.008 | 0.166 ^a \pm 0.004 | 0.242 ^a \pm 0.001 | 0.406 ^a \pm 0.004 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con 10% de sólidos | | | | | |
| N | 1.798 ^b \pm 0.012 | 0.240 ^b \pm 0.005 | 0.125 ^b \pm 0.001 | 0.212 ^b \pm 0.012 | 0.342 ^b \pm 0.012 |
| ND 2:1 | 1.082 ^c \pm 0.004 | 0.187 ^c \pm 0.004 | 0.165 ^c \pm 0.003 | 0.181 ^c \pm 0.008 | 0.265 ^c \pm 0.006 |
| ND 1:1 | 1.002 ^c \pm 0.004 | 0.300 ^d \pm 0.003 | 0.150 ^d \pm 0.010 | 0.196 ^{bc} \pm 0.004 | 0.356 ^d \pm 0.002 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con 20% de sólidos | | | | | |
| N | 1.626 ^b \pm 0.021 | 0.246 ^b \pm 0.007 | 0.164 ^a \pm 0.002 | 0.197 ^a \pm 0.021 | 0.298 ^b \pm 0.004 |
| ND 2:1 | 1.177 ^c \pm 0.004 | 0.241 ^b \pm 0.004 | 0.148 ^b \pm 0.003 | 0.224 ^a \pm 0.004 | 0.356 ^c \pm 0.006 |
| ND 1:1 | 0.997 ^d \pm 0.005 | 0.320 ^d \pm 0.007 | 0.166 ^a \pm 0.008 | 0.221 ^a \pm 0.005 | 0.418 ^d \pm 0.003 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con 30% de sólidos | | | | | |
| N | 1.483 ^b \pm 0.013 | 0.287 ^b \pm 0.005 | 0.150 ^b \pm 0.005 | 0.225 ^b \pm 0.013 | 0.358 ^b \pm 0.005 |
| ND 2:1 | 1.148 ^c \pm 0.037 | 0.194 ^c \pm 0.004 | 0.169 ^a \pm 0.003 | 0.230 ^b \pm 0.007 | 0.365 ^{bc} \pm 0.006 |
| ND 1:1 | 0.937 ^d \pm 0.004 | 0.350 ^a \pm 0.006 | 0.172 ^a \pm 0.003 | 0.203 ^c \pm 0.004 | 0.408 ^c \pm 0.005 |

En los datos de la Tabla 3.4 se observa diferencia significativa en la dureza de las masas nixtamalizadas con nejayote respecto a la masa control. Sin embargo la masa que tuvo la menor dureza fue ND 1:1 con 30% de sólidos adicionados. Con respecto a la cohesividad, la masa control presentó un valor de 0.353^a \pm 0.008, mientras que la masa NDS 1:1 con el 30% de sólidos adicionados tuvo un valor de 0.350^a \pm 0.006, en las que no hubo diferencia significativa. Quintanar *et al.* (2009) mencionan que en ambos procesos, industrial y pequeños molineros, la masa debe ser lo suficientemente cohesiva para permitir la

formación de una lámina delgada, que facilite el corte para formar discos o cualquier otra forma. Así mismo, se observa que la masa NDS 1:1 con el 20% de sólidos adicionados presentó una resiliencia de 0.166 ± 0.008 , igual que la masa control (0.166 ± 0.004), mientras que en la masa NDS 1:1 con el 30% de sólidos adicionados aumentó el valor de la resiliencia (0.172 ± 0.003). En cuanto a la elasticidad total se encontraron diferencias significativas al adicionar sólidos y nixtamalizar con nejayote para las diferentes diluciones.

La elasticidad total aumentó en NDS 1:1 con 20% de sólidos (0.418 ± 0.003) y NDS 1:1 con 30% de sólidos (0.408 ± 0.005), respecto a la masa testigo (0.406 ± 0.004). Estos datos corresponden con los obtenidos en la resiliencia, por lo que agregar un mayor porcentaje de sólidos ayuda a tener una masa con una mejor consistencia, como lo reportó Ramírez-Romero *et al.* (2011). Sin embargo, una masa que es nixtamalizada con agua de nejayote diluido aporta mayor contenido de CaCO_3 , ya que este componente aumentó de la masa control C (1 mg/g) a la masa NDS 1:1 SN 30% (3 mg/g) (ver Figura 3.2), lo cual nos proporciona una masa con mayor aporte de calcio.

Con los resultados obtenidos se afirma que el emplear masas nixtamalizadas con NDS 1:1 con 30% de sólidos de nejayote disminuye la dureza y aumenta la cohesividad, acercándose los valores a la masa nixtamalizada con agua (Control).

3.6 Propiedades viscoelásticas

Para analizar el comportamiento viscoso y elástico del material, se realizó un análisis reológico, aplicando pruebas dinámicas a las masas de maíz nixtamalizado.

3.6.1 Zona de viscoelasticidad lineal

El rango de viscoelasticidad lineal (zona donde el material no ha sufrido daño en su estructura), fue determinado a partir de los barridos de esfuerzo contra el módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'').

En las Figuras 3.3 a y b se muestran los módulos de almacenamiento G' y pérdida G'' , respectivamente en función del esfuerzo realizado a una de las masas.

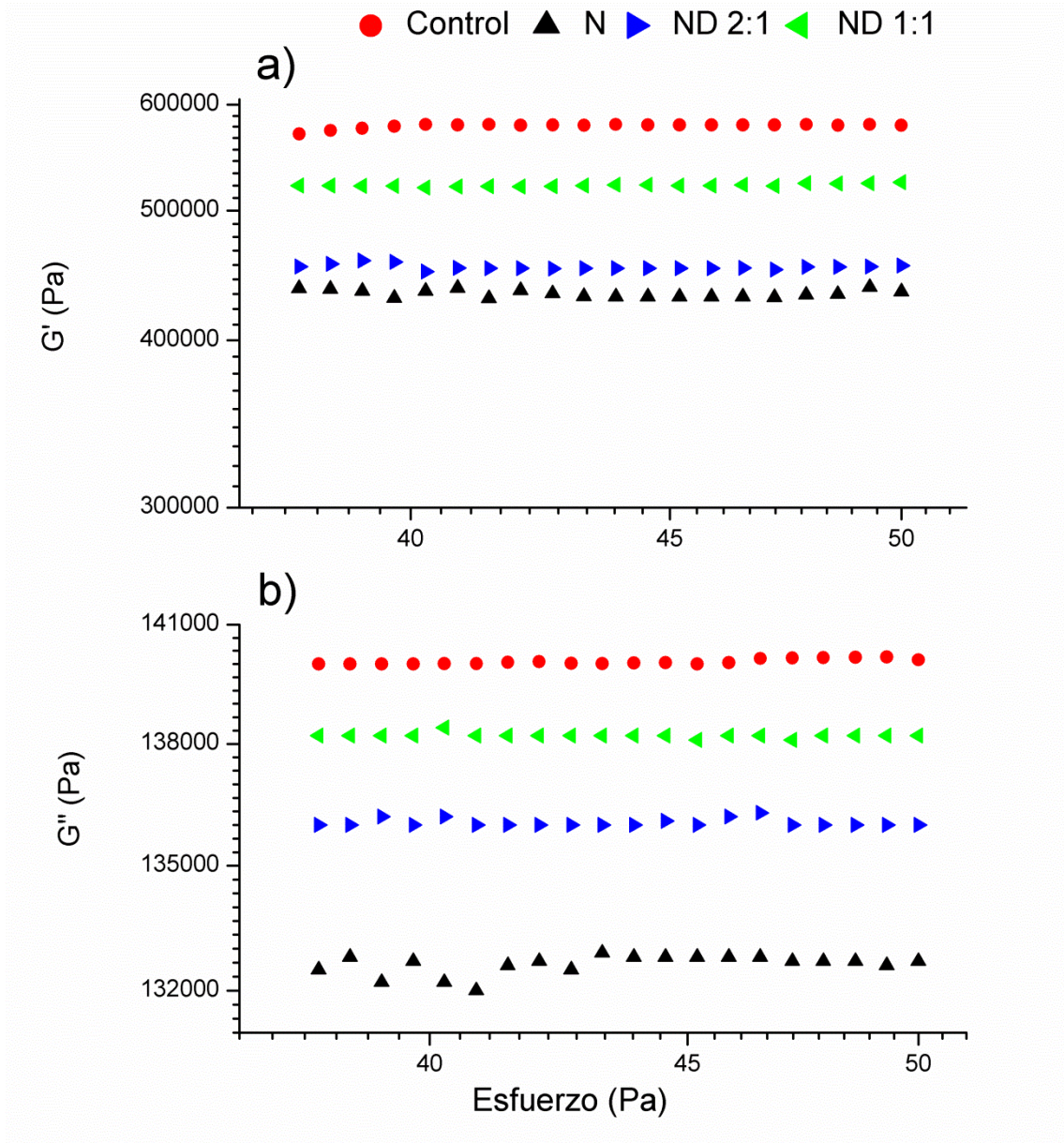


Figura 3.3 Barrido de esfuerzos para masas testigos sin sólidos de nejayote a) G' en función del esfuerzo b) G'' en función de esfuerzo

En la Figura 3.3 se puede observar la zona lineal, la cual es amplia, por lo que se trabajó con valores pequeños como referencia para el barrido de frecuencia, en el caso de las demás muestras los resultados fueron muy similares, por lo que se decidió trabajar con un esfuerzo de 45 Pa para los barridos de frecuencias.

3.6.2 Barridos dinámicos oscilatorios de frecuencia (método dinámico)

En las Figuras 3.4 a, b y c se muestran los valores de módulo de almacenamiento G' , módulo de pérdida G'' y $\tan \delta$, respectivamente, para la masa control (C) y masas nixtamalizadas con nejayote.

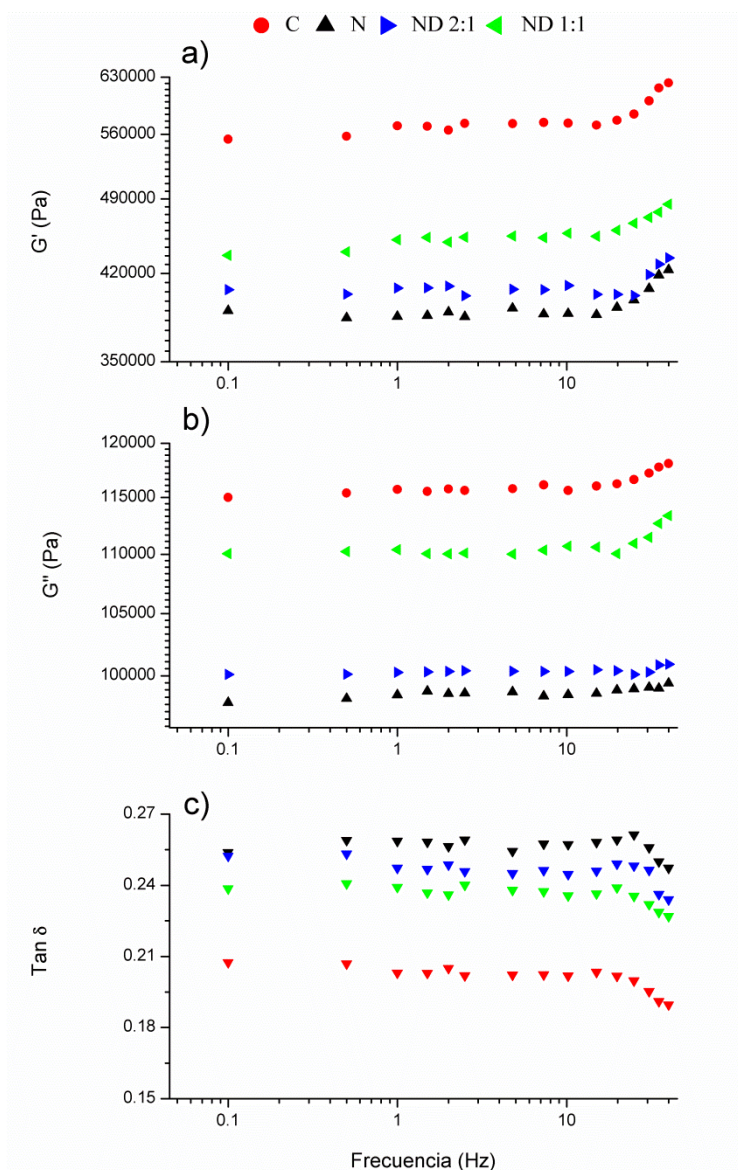


Figura 3.4. a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote sin sólidos

En las Figuras 3.4 a y b, se observa que hay diferencia significativa entre la masa C y las masas N, ND 2:1 y ND 1:1, sin embargo no hay diferencia significativa entre las masas N y ND 2:1. Respecto al módulo de almacenamiento G' , la muestra control presenta los

mayores valores respecto a las masas nixtamalizadas con nejayote, esto podría indicar que la elasticidad de estas masas disminuyó respecto a la masa control debido a la cantidad de nejayote utilizado en la nixtamalización, que al tener un mayor contenido de carbonatos de calcio confiere una mayor dureza a la masa.

La Figura 3.4 c representa los valores de tangente, que es la relación entre G''/G' . La $\tan \delta$, toma valores de 0 ($\delta=0^\circ$) a 1 ($\delta=90^\circ$), predominando un comportamiento elástico y viscoso, respectivamente (Khatkar y Schofield, 2002; Rao, 1999). Es decir, si $G' > G''$ ($\tan \delta < 1$) el material es considerado predominantemente un gel o un sólido, por el contrario, cuando $G' < G''$ ($\tan \delta > 1$), entonces el material se comporta como un líquido (Rutuja *et al.*, 2012). En esta Figura se observa que las masas tienen una tendencia con características de un material sólido elástico, ya que los valores son más cercanos a 0. Estos datos concuerdan con lo reportado anteriormente por Escalante-Aburto *et al.* (2011) en un estudio de evaluación de propiedades viscoelásticas de masas de maíz nixtamalizado extruidas. Así mismo, se observa que la masa N, nixtamalizada con nejayote tiene valores más bajos de $\tan \delta$, respecto a las masas.

En las Figuras 3.5 a, b y c se muestran los valores de módulo de almacenamiento G' , módulo de pérdida G'' y $\tan \delta$, respectivamente, para las masas de maíz nixtamalizado con 10% de sólidos de nejayote.

La masa nixtamalizada con agua y 10% de sólidos, al igual que las masas sin sólidos (Figura 3.4), la masa control presenta un mayor módulo de almacenamiento G' en comparación a las muestras nixtamalizadas con nejayote N, ND 2:1 y ND 1:1. Respecto al módulo de pérdida G'' no hay diferencia significativa entre la masa control y la masa nixtamalizada ND 1:1. Así mismo, se observa que los valores de G' y G'' aumentan a mayor concentración de nejayote. Al aumentar la relación $\tan \delta$, indica que al nixtamalizar con nejayote disminuye la elasticidad de las masas, mostrando diferencia significativa entre la masa control y las masas nixtamalizadas con nejayote.

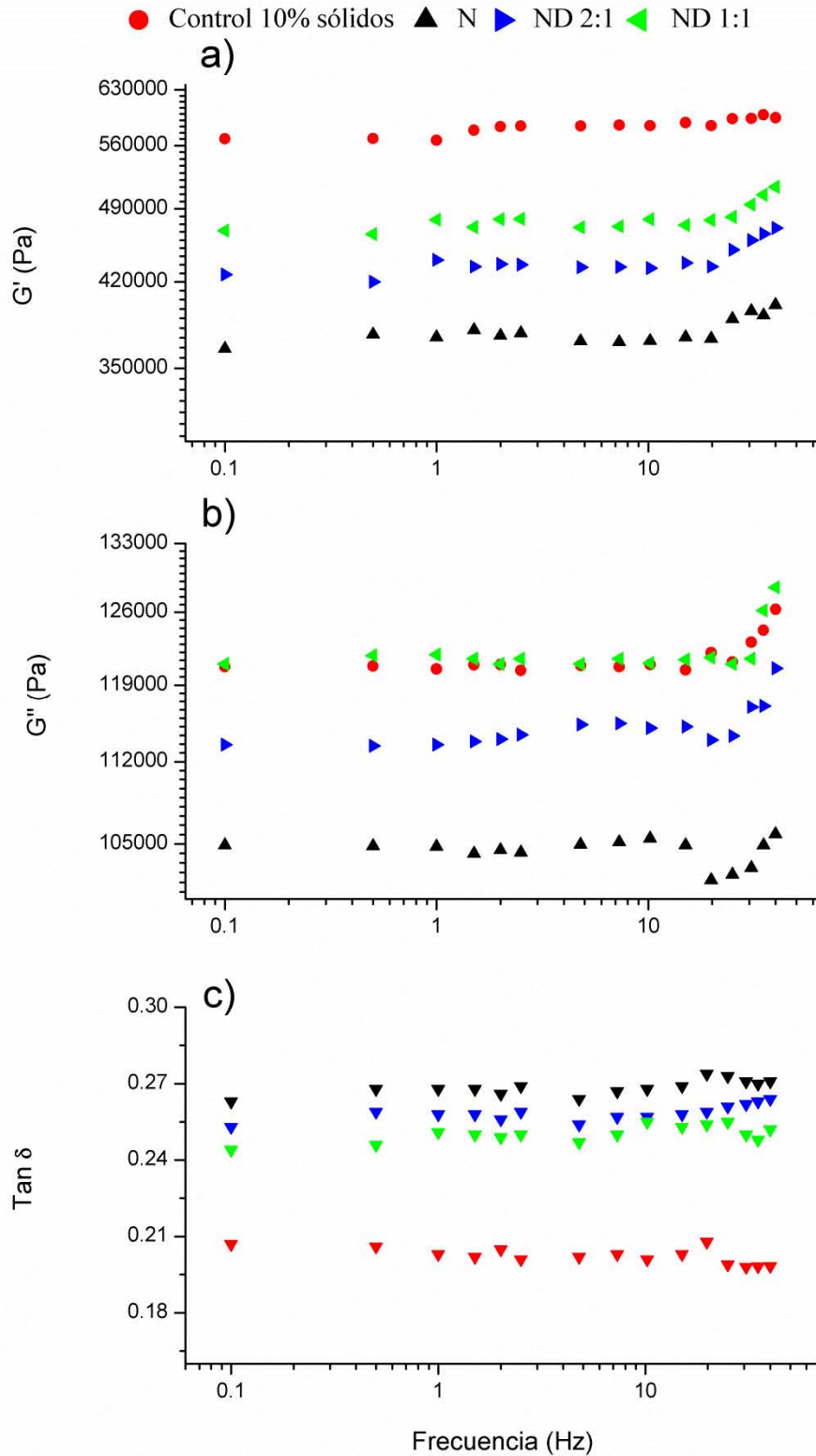


Figura 3.5. a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote y 10% de sólidos

En las Figuras 3.6 a, b y c se muestran los valores de módulo de almacenamiento G' , módulo de pérdida G'' y $\tan \delta$, respectivamente, para las masas de maíz nixtamalizado con 20% de sólidos de nejayote.

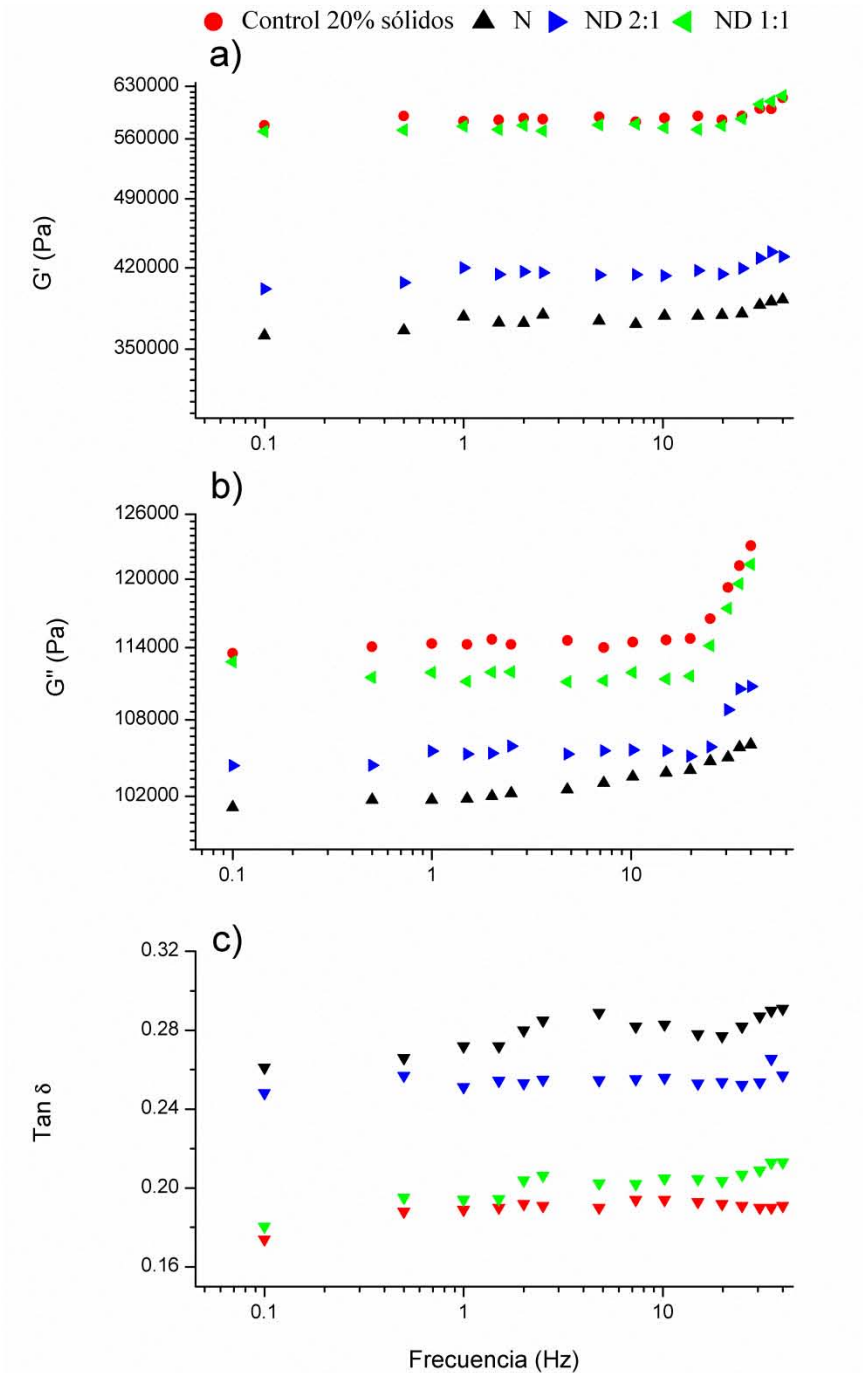


Figura 3.6. a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\tan \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote y 20% de sólidos

En la Figura 3.6a, se observa que los valores de G' aumentan en relación a los obtenidos sin adicionar sólidos (Figura 3.4a) y adicionando 10% de sólidos (Figura 3.5a). Así mismo, en la Figura 3.6a se muestra que los mayores valores de módulo de almacenamiento corresponden a la masa nixtamalizada con agua y con la masa ND 1:1, entre los cuales no hay diferencia significativa. En los valores de G' y $\tan \delta$, en algunos de los valores no hay diferencia significativa.

En las Figuras 3.7 a, b y c se muestran los valores de módulo de almacenamiento G' , módulo de pérdida G'' y $\tan \delta$, respectivamente, para las masas de maíz nixtamalizado con 30% de sólidos de nejayote.

En la Figura 3.7a, se observa que los valores de G' aumentan en relación a los obtenidos con 20% de sólidos adicionados. Al igual que la Figura 3.6a, en la Figura 3.7a no hay diferencia significativa entre las masas nixtamalizadas con agua y con ND 1:1. En la Figura 3.7c se observa que al aumentar la concentración del nejayote en la nixtamalización aumentan los valores de $\tan \delta$, siendo menos elásticas.

Los polisacáridos presentes en el nejayote, al igual que otros hidrocoloides como la carboximetilcelulosa, goma guar, xantana, goma arábica entre otros, muestran propiedades funcionales como agentes espesantes, estabilizantes, emulsificantes y formadores de gel, lo cual los hace sustentables para usar en una variedad de aplicaciones en la industria de alimentos (Gurkin, 2002). Sin embargo, la adición de hidrocoloides puede modificar las propiedades reológicas de la masa. Este hecho puede ser benéfico para las tortillas porque adicionar hidrocoloides a la masa puede mejorar la calidad de las tortillas, haciendo que estas sean más fáciles de enrollar después de ser almacenadas (Twillman y White, 1988).

Respecto a los valores de la $\tan \delta$ obtenidos en las Figuras 3.5c, 3.6c y 3.7c, fueron de 0.18-0.29, los cuales caen en el rango de 0.1-0.3, típicos de un gel viscoelástico débil (Ferry, 1980), como lo es la masa de maíz.

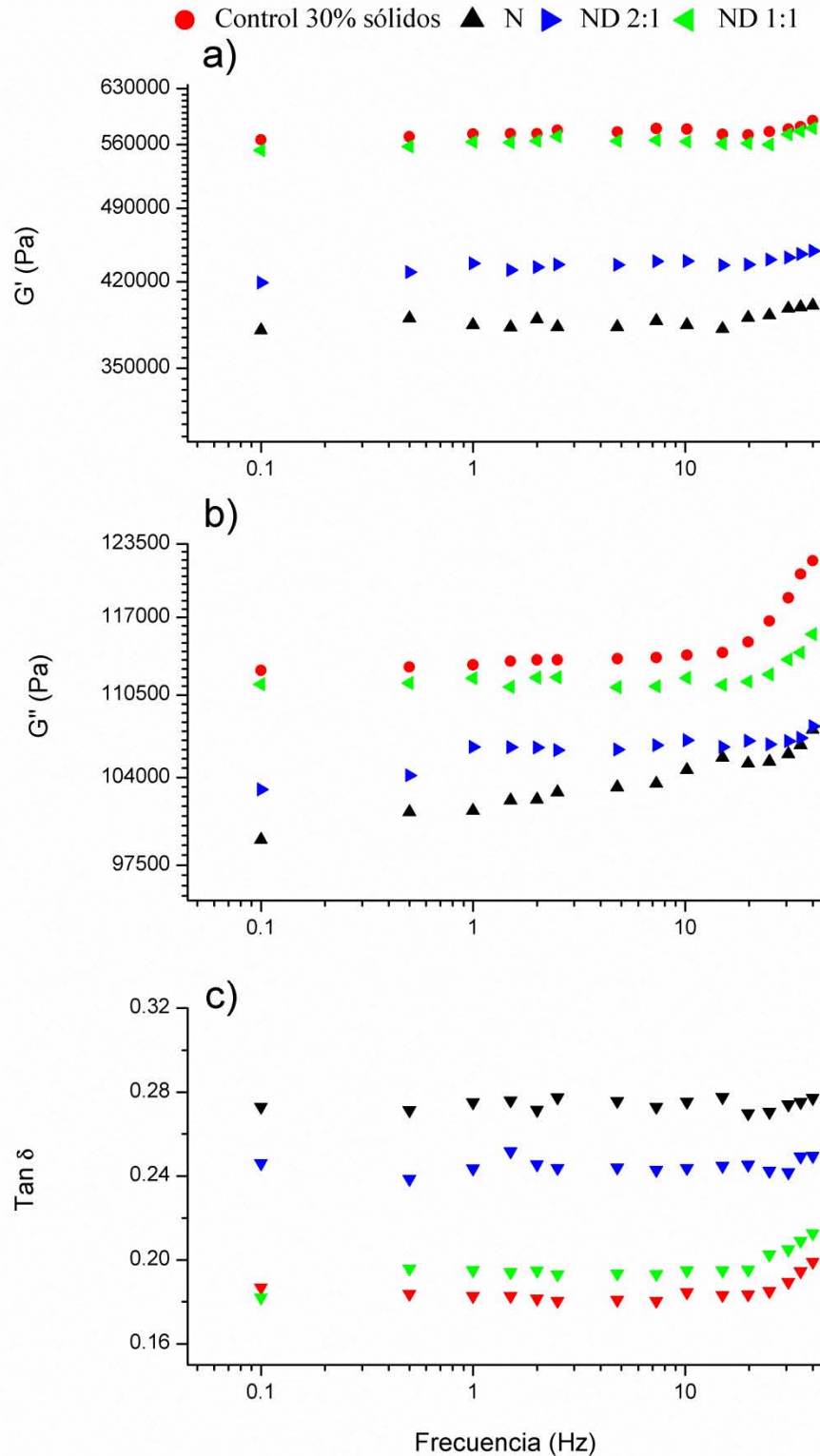


Figura 3.7a) Módulo de almacenamiento (G'), b) módulo de pérdida (G'') y c) $\text{Tan } \delta$ vs frecuencia de masas nixtamalizadas con nejayote y 30% de sólidos.

En las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7, se observó que el valor de G' es mayor al valor de G'' , lo cual significa que en la respuesta de la muestra predomina el componente elástico (G'). Los valores de todas las muestras para G' y G'' presentaron una tendencia a incrementarse, al aumentar la frecuencia, lo cual puede ocasionarse debido a una resistencia a la deformación (Platt-Lucero, 2011). En estas gráficas se observó que el módulo de pérdida G'' (viscosidad del material) es menor al emplear nejayote, es decir tiende a ser menos viscoso posiblemente por la presencia de carbonatos que producen estructuras rígidas en la masa. Sin embargo, se observó un aumento del módulo de almacenamiento G' (elasticidad del material) al aumentar el porcentaje de sólidos adicionados, esto podría ser por la presencia de gomas presentes en los sólidos, por lo que al utilizar menores diluciones de nejayote y más concentraciones de sólidos aumenta la elasticidad de las masas, sin modificar drásticamente sus propiedades viscoelásticas.

En la Tabla 3.5 se muestran las funciones materiales viscoelásticas G' , G'' y $\tan \delta$ a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con sólidos de nejayote.

Tabla 3.5 Funciones materiales viscoelásticas a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con sólidos de nejayote. Valores promedio \pm desviación estándar. n=2 repeticiones

Los valores promedio con superíndices (letras) diferentes dentro de columna son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$.

| Muestra | G' Módulo de almacenamiento (Pa) | G'' Módulo de pérdida (Pa) | Tan δ (Tangente de ángulo de fase) |
|---|--|------------------------------------|--|
| Masas nixtamalizadas con sólidos de nejayote | | | |
| C | 576300 ^a \pm 8915 | 116250 ^a \pm 5631 | 0.201 ^a \pm 0.006 |
| 10% sólidos | 391533 ^b \pm 6013 | 98880 ^b \pm 843 | 0.252 ^b \pm 0.005 |
| 20% sólidos | 402267 ^b \pm 10099 | 100400 ^b \pm 630 | 0.249 ^b \pm 0.005 |
| 30% sólidos | 459300 ^d \pm 6695 | 110053 ^a \pm 753 | 0.239 ^d \pm 0.006 |

Como se observa en la Tabla 3.5 el módulo de almacenamiento (el cual representa el comportamiento elástico del material), entre los distintos tratamientos no se observa diferencia significativa entre 10 y 20% de sólidos, sin embargo con el 30% de sólidos adicionados se observa un incremento. El mismo comportamiento se observa respecto al módulo de pérdida (comportamiento viscoso del material). Respecto a los valores de $\tan \delta$ se observa un aumento con el 10 y 20% de sólidos, sin embargo con el 30% de sólidos disminuye, debido a los arabinosidos presentes le confieren ciertas características al material. En la tabla 3.6 se muestran las funciones materiales viscoelásticas para las masas nixtamalizadas con nejayote.

Tabla 3.6 Funciones materiales viscoelásticas a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con nejayote. Valores promedio \pm desviación estándar. n=2 repeticiones

Los valores promedio con superíndices (letras) diferentes dentro de columna son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$.

| Muestra | G' Módulo de almacenamiento (Pa) | G'' Módulo de pérdida (Pa) | Tan δ (Tangente de ángulo de fase) |
|--|--|----------------------------------|--|
| C | 576300 ^a \pm 8915 | 116250 ^a \pm 5631 | 0.201 ^a \pm 0.006 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote (Sin sólidos) | | | |
| N | 391533 ^b \pm 6013 | 98880 ^b \pm 843 | 0.252 ^b \pm 0.005 |
| ND 2:1 | 402267 ^c \pm 10099 | 100400 ^c \pm 630 | 0.249 ^c \pm 0.005 |
| ND 1:1 | 459300 ^d \pm 6695 | 110053 ^a \pm 753 | 0.239 ^d \pm 0.006 |

En la Tabla 3.6 se observa que hay diferencia significativa en todas las funciones materiales. Al utilizar mayores cantidades de nejayote el módulo del almacenamiento (G') disminuye, al igual que el módulo de pérdida (G''). En cuanto a la Tan (δ) hay un aumento significativo en todas las masas nixtamalizadas con nejayote respecto a la masa control (C), por lo que disminuye la elasticidad, lo cual podría ser al aumento de carbonatos de calcio presentes en el nejayote, ya que en el Análisis de Perfil de Textura resultaron ser las masas con mayor dureza.

En la Tabla 3.7 se muestran las funciones materiales viscoelásticas para las masas nixtamalizadas con nejayote y sólidos de nejayote.

Tabla 3.7 Funciones materiales viscoelásticas a una frecuencia de 20 Hz en masas de maíz nixtamalizadas adicionadas con nejayote y sólidos de nejayote. Valores promedio \pm desviación estándar. n=2 repeticiones

Los valores promedio con superíndices (letras) diferentes dentro de columna son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$.

| Muestra | G' Módulo de almacenamiento (Pa) | G'' Módulo de pérdida (Pa) | Tan δ (Tangente de ángulo de fase) |
|---|---|---|---|
| Masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con 10% de sólidos | | | |
| 10% sólidos | 584250 ^a \pm 18414 | 122075 ^a \pm 1068 | 0.208 ^a \pm 0.005 |
| N | 372450 ^b \pm 17770 | 102050 ^b \pm 1020 | 0.273 ^b \pm 0.007 |
| ND 2:1 | 433900 ^c \pm 17779 | 113900 ^c \pm 1150 | 0.262 ^c \pm 0.007 |
| ND 1:1 | 478600 ^d \pm 15325 | 121600 ^a \pm 1190 | 0.2541 ^c \pm 0.007 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con 20% de sólidos | | | |
| 20% sólidos | 584100 ^a \pm 18414 | 114790 ^a \pm 982 | 0.196 ^a \pm 0.005 |
| N | 377700 ^b \pm 17770 | 104000 ^b \pm 828 | 0.275 ^b \pm 0.007 |
| ND 2:1 | 413900 ^c \pm 17773 | 105070 ^b \pm 870 | 0.253 ^c \pm 0.007 |
| ND 1:1 | 576700 ^a \pm 18429 | 111900 ^c \pm 900 | 0.206 ^a \pm 0.007 |
| Masas nixtamalizadas con nejayote adicionadas con 30% de sólidos | | | |
| 30% sólidos | 571600 ^a \pm 8915 | 104900 ^a \pm 984 | 0.18 ^a \pm 0.006 |
| N | 389300 ^b \pm 6013 | 105070 ^b \pm 984 | 0.26 ^b \pm 0.005 |
| ND 2:1 | 435300 ^c \pm 7695 | 106840 ^a \pm 900 | 0.24 ^c \pm 0.005 |
| ND 1:1 | 561450 ^a \pm 9687 | 111600 ^a \pm 984 | 0.19 ^a \pm 0.007 |

Como se observa en la Tabla 3.7, el módulo de almacenamiento (el cual representa el comportamiento elástico del material), presentó su valor más bajo al nixtamalizar con nejayote y adicionando 10% de sólidos (372450 ± 17770), sin embargo no hay diferencia significativa entre las masas nixtamalizadas con nejayote, adicionadas con 20 y 30% de sólidos.

El valor más alto de G'' se manifestó en la masa nixtamalizada con agua adicionada de 10% de sólidos (584250 ± 18414), sin embargo no hubo diferencia significativa con la masa control C, las masas nixtamalizadas con agua y nejayote ND:1:1, adicionadas de sólidos de nejayote 20 y 30%. Estos resultados muestran que nixtamalizar con nejayote ND 1:1, adicionando sólidos se obtiene una masa con parámetros reológicos similares que la masa control.

Respecto a los valores de $\tan \delta$ aumentan al usar concentraciones mayores de nejayote, sin embargo, al adicionar concentraciones mayores de sólidos de nejayote se recupera la elasticidad de las masas, debido a que los arabinosidos presentes le confieren ciertas características elásticas al material.

En la Tabla 3.7 se muestra que el valor más bajo de $\tan \delta$ lo presentó la masa nixtamalizada con agua adicionada de 30% de sólidos de nejayote (0.18 ± 0.006), sin embargo no hay diferencia significativa respecto a la masa nixtamalizada con nejayote ND 1:1, adicionada de 30% de sólidos. Aguirre-Cruz *et al.* (2005) mencionan que la adición de hidrocoloides interfiere con los componentes de la estructura de la masa en un ambiente acuoso comportándose como un gel. Por lo anterior la adición de sólidos a las masas mejora su consistencia confiriendo una mayor elasticidad.

3.7 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

En la siguiente Tabla 3.8 se muestra una comparación en los valores de los parámetros texturales y de las funciones materiales viscoelásticas de la masa nixtamalizada con nejayote diluido 1:1 con 30% de sólidos de nejayote.

Tabla 3.8 Comparación de propiedades texturales y reológicas para la prueba de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los valores promedio con superíndices (letras) diferentes dentro la misma fila son significativamente diferentes con un valor de $p < 0.05$.

| Parámetro | Masa control nixtamalizada sin sólidos de nejayote | Masa nixtamalizada Nejayote 1: 1 (Nejayote/Agua) 30% Sólidos de Nejayote |
|------------------------------------|--|--|
| Dureza (N) | 0.520 ^a ± 0.013 | 0.937 ^b ± 0.004 |
| Cohesividad | 0.353 ^a ± 0.008 | 0.350 ^a ± 0.006 |
| Resilencia | 0.166 ^a ± 0.004 | 0.172 ^a ± 0.003 |
| Índice Elástico Instantáneo | 0.242 ^a ± 0.001 | 0.203 ^b ± 0.004 |
| Índice Elástico Total | 0.406 ^a ± 0.004 | 0.408 ^a ± 0.005 |
| G' Módulo de almacenamiento (Pa) | 576300 ^a ± 8915 | 561450 ^a ± 9687 |
| G'' Módulo de pérdida (Pa) | 116250 ^a ± 5631 | 111600 ^a ± 984 |
| Tan δ (Tangente de ángulo de fase) | 0.201 ^a ± 0.006 | 0.19 ^a ± 0.007 |

En la Tabla 3.8 se observa que los parámetros de dureza e índice elástico instantáneo hay diferencia significativa, sin embargo en todos los demás parámetros (cohesividad, resilencia, índice elástico total, G', G'' y Tan δ) no hay diferencia significativa. Es importante señalar que el aumento de dureza de la masa control a la masa nixtamalizada con nejayote ND 1:1 30% de sólidos se debe por la presencia de carbonato de calcio presente en el agua de nejayote. Sin embargo, los parámetros reológicos de cohesividad y reológicos no fueron modificados, parámetros importantes para la formación de la masa de tortillas, como lo reporto Quintanar *et al.* (2009).

La Figura 3.3 muestra imágenes de SEM tomadas a 30x. En la Figura 3a se muestra la masa control C nixtamalizada con agua, mientras que la Figura 3b muestra la masa nixtamalizada NDS con 30% de sólidos de nejayote. Esta muestra fue seleccionada debido a que presentó los parámetros de textura y viscoelásticos sin diferencia significativa respecto a la masa control C, a excepción de la dureza (Tabla 3.8).

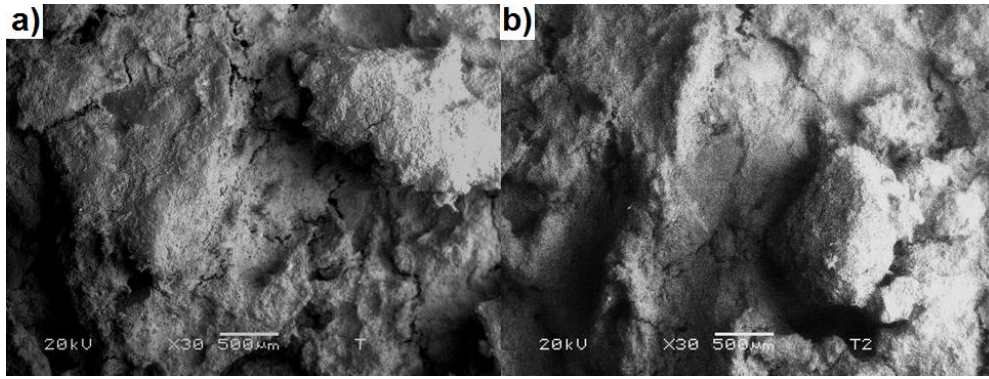


Figura 3.8 Imágenes de SEM tomadas a 30x. a) Masa control nixtamalizada sin sólidos de nejayote, b) Masa nixtamalizada con ND 1:1 con 30% de sólidos de nejayote

Como se observa en las Figuras 3a y 3b, no hay cambios drásticos visuales en la apariencia de las masas, ya que en ambas muestras se observa una estructura firme. Las grietas que se observa en las masas son originadas por la pérdida de humedad que hay durante el vacío que se genera para realizar el análisis. En otro sentido las muestras no se observaron a mayor aumento por que el interés era observar la textura y no componentes químicos.

CONCLUSIONES

El aumento en el contenido de CaCO_3 en las masas es significativo cuando se nixtamaliza con agua de nejayote y sus diluciones, lo cual fortifica con calcio las masas, elemento indispensable en la dieta humana.

Los parámetros de textura analizados se ven afectados significativamente cuando se nixtamaliza con nejayote sin diluir, disminuyendo la cohesividad y aumentando la dureza, pero estos parámetros no se ven afectados notoriamente si se agrega el nejayote en diluciones 1:1.

Al adicionar un porcentaje de sólidos de nejayote aumenta significativamente la elasticidad de las masas, por lo que se recomienda nixtamalizar con NDS 1:1 con 30% de sólidos.

Las variaciones en las funciones materiales viscoelásticas evaluados indican que hay cambios en la estructura y composición de las masas nixtamalizadas con agua de nejayote y al adicionar sólidos, sin embargo emplear diluciones de agua de nejayote y sólidos que se pueden recuperar por sedimentación en la nixtamalización, las masas resultan con valores de G' , G'' y $\tan \delta$ semejantes.

Emplear el nejayote y sus sólidos como una alternativa para nixtamalizar, no sólo fortifica las masas, ayuda a reducir el desecho del líquido por el drenaje, lo cual es benéfico para el medio ambiente.

Consumir tortillas con altos valores de CaCO_3 puede ser un suplemento de calcio adecuado, además el emplear agua de nejayote disminuye la contaminación al medio ambiente y se ahorra una cantidad considerable de agua.

Se recomienda continuar con la investigación elaborando las tortillas y realizar análisis de textura, reológicos y sensoriales.

REFERENCIAS

- ✓ Aguirre-Cruz A., Méndez-Montevalvo G., Solorza-Feria J., Bello-Pérez. L. A. (2005). Effect of carboxymethylcellulose and xanthan gum on the thermal, functional and rheological properties of dried nixtamalised maize masa Carbohydrate Polymers, 62, 222–231.
- ✓ Almeida-Domínguez, H.D., Cepeda, M., Rooney, L.W. (1996). Properties of commercial nixtamalized corn flours. Cereal Foods World 41, 624–630.
- ✓ Andreasen, M.F., Kroon, P.A., García-Conesa, M.T. (2001). Intestinal realise and uptakeof phenolic antioxidant diferulic acid. Free Radical and Medicine. 31, 304-314.
- ✓ Arámbula, V.G., Barrón, A.L., González, H.J., Moreno, M.E. y Luna, B.G. (2001). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 42(3) ,103.
- ✓ Bartolo-Pérez, P., Peña, J.L., Cruz-Orea, A., Calderón, A. (1999). "Estudio de la composición química de pericarpio de maíz con las técnicas XPS y EDAX". Superficies y vacío 1, 64-68.
- ✓ Belitz, H.D. y Grosh, W. (1999). Química de los alimentos. Ed. Acribia, España.
- ✓ Bedolla, S. y Rooney, L.W. (1984). Characteristics of US and Mexican instant maize flours for tortilla and snack preparation. Cereal Foods World, 29 (11), 732-735.
- ✓ Bello P.L.A., Osorio D.P., Agama A.E., Núñez S.C., y Paredes L.O. (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masa y harinas de maíz nixtamalizado, Agrociencia 36, 319-328.
- ✓ Borwankar RP, Frye LA, Blaurock AE, Sasevich FJ (1992). Rheological characterization of melting of margarines and tablespreads. Journal of Food Engineering, 16, 55-74.
- ✓ Bourne, M.C. (1978). Texture profile analysis. Food Technology, 32, 62-66.
- ✓ Bourne, M.C. (2002). Food Texture and Viscosity: concept and measurement. Academic Press. 2nd ed. England.

- ✓ Bressani, R. (1992). Nutritional value of high lysine maize in humans. Quality protein Maize. Ed. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, USA.
- ✓ Casas, A.N.B. y Ramírez, O.M.E. (1998). Evaluación de la textura de materiales en máquina universal de deformación. Curso de superación académica. Departamento de Ingeniería y Tecnología. Sección LEM. Alimentos. UNAM.
- ✓ Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortéz, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *Journal of Food Engineering* 96, 401-409.
- ✓ De la Parra, C., Serna-Saldivar, S.O., R.H. (2007). Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 55, 4177-4183.
- ✓ Del Pozo-Insfran, D., Serna-Saldivar, S.O., Brenes, C., Talcott, S. (2007). Polyphenolics and antioxidant capacity of white and blue corns processed into tortillas and chips. *Cereal Chemistry* 84, 162-168.
- ✓ DMS. Nutritional Products. 2012. http://www.dsm.com/en_US/nip/public/home/downloads/Maiz.pdf. Fecha de consulta: 20 de Julio 2012.
- ✓ Eastell, R. (1998). Treatment of postmenopausal osteoporosis. *The New England Journal of Medicine*. 338: 736–46.
- ✓ Escalante-Aburto A., Ponce-García N., Silvas-García M.I., Magaña-Barajas, Platt-Lucero L.C., Campa-Ramos R., Torres-Chavez P.I., Ramírez-Wong, B. Evaluación de la Viscoelasticidad de Masas de Maíz Obtenidas por diferentes Procesos. (2011). *Memorias del Simposium Internacional sobre Tecnologías convencionales y Alternativas en el Procesamiento del Maíz*. Agosto, 133-140.
- ✓ FAO (1993). El maíz en la nutrición humana. Departamento de agricultura. <http://www.fao.org/docrep/t0395s/t0395s00.htm>. Fecha de consulta: 23 de Julio 2010.
- ✓ Fernández-Muñoz, J.L., San Martín-Martínez, E., Díaz-Góngora, J. A. I., Calderón, A., Alvarado-Escobar, A., Ortiz-Cárdenas, H., Leal-Pérez, M. (2006). Steeping time

and cooking temperature dependence of calcium ion diffusion during microwave nixtamalization of corn. *Journal of Food Engineering* 76, 568-572.

- ✓ Ferry, J.R. (1980). *Viscoelastic properties of polymers*, 3rd Ed. John Wiley & Sons. New York.
- ✓ Figueroa, C.J. de D., Martínez, B.F., González, H.J., Sánchez, S.F. (1994). Modernización tecnológica del proceso de nixtamalización. *Industria Alimentaria*. Mayo-Junio 6 (7), 23-27.
- ✓ García-Rejón, A. (1981). Introducción a la reología de los polímeros. *Plastinoticias*, septiembre, 37-54.
- ✓ Gasca, M.J.C., Casas, A.N.B. (2007). Adición de harina de maíz nixtamalizado a masa fresca de maíz nixtamalizado. Efecto en las propiedades texturales de la masa y tortilla. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 6 (03), 317-328.
- ✓ Gomez, M.H., Rooney, L. W. y Waniska, R.D. (1987). Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World* 32 (5), 372-377.
- ✓ González, J., Figueroa C.J. de D., Sánchez, S.F., Martínez, D.L.J., Ruíz, T.M. (1997). Technological Modernization of the alkaline cooking process for the production of masa and tortilla. World Scientific Publishing Co. Pte. LTD Singapore, London, 162-179.
- ✓ González, R., Reguera, E., Mendoza, L., Figueroa, J. M., Sánchez-Sinencio, F., (2004). Physicochemical changes in the hull of corn grain during alkaline cooking. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 52, 3832-3837.
- ✓ Goodwin, J., Hughes, R. (2000). *Rheology for Chemists: An introduction*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- ✓ Grupo Contri, S.A. de C.V. (2006). <http://www.contri.com.mx>. Fecha de consulta: 25 de Marzo 2012.
- ✓ Gurkin, S. (2002). Hydrocolloids-ingredients that add flexibility to tortilla Processing. *Cereal Food World* 47:41-43
- ✓ Gutiérrez-Cortéz, E., Rojas-Molina, I., Pons-Hernández, J.L., Guzmán, H., Aguas-Ángel, B., Arenas, J., Fernández, P., Palacios-Fonseca, A., Herrera, G., Rodríguez, M.E. (2007). Study of calcium ion diffusion in nixtamalized quality protein maize as a function of cooking temperature. *Cereal Chemistry* 84, 186–194.

- ✓ Gutiérrez-Cortéz, E., Rojas-Molina, I., Rojas, A., Arjona, J.L., Cornejo-Villegas, M.A., Zepeda-Benítez, Y. (2010). Microstructural changes in the maize kernel pericarp during cooking stage in nixtamalization process. *Journal of Cereal Science* 51, 81-88.
- ✓ Gutiérrez-Uribe, J., Rojas-García, C., García-Lara, S., Serna-Saldivar, S. (2010). Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science* 52, 410-416.
- ✓ Heaney. R.P. (2000). Calcium, dairy products, and osteoporosis. *Journal of the American College of Nutrition*. 19, 835–995.
- ✓ Hernández-Sámamo, A.I. (2009). Establecimiento del tiempo de cocción de granos de maíz mediante variables cuantitativas durante el proceso de nixtamalización. Tesis de Ingeniería en Alimentos. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. México.
- ✓ Heyman, F., Lindahl, B. Persson, L, Wikström, M., Stenlid, J. (2007). Calcium concentrations of soil affect suppressiveness against *Aphanomyces* root rot of pea. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 2222-2229.
- ✓ IICA-Prociandino. (1995). Experiencias en el cultivo del maíz en el Área Andina” Volumen III. Ed. Prociandino. Quito, Ecuador.
- ✓ Industrializadora de Maíz SA. de CV. (2012). <http://www.imsa.com.mx>. Fecha de consulta: 30 de Julio 2012.
- ✓ Khatkar, B.S. y Schofield, J.D. (2002). Dynamic rheology of wheat flour dough. Non-Linear viscoelastic behavior. *Journal Science Food Agricultural* 82, 827-829.
- ✓ Klaus J. L., y Karel K. (1991). *Handbook of Cereal Science and Technology*, Inc. New York. 23 (2), 321-325.
- ✓ Littke, K. y Zabowski, D. (2007). Influence of calcium fertilization on Douglas-fir foliar nutrient, soil nutrient availability and sinuosity in coastal Washington. *Forest Ecology and Management* 247, 140-148.
- ✓ Macosko, W.C. (1994). *Rheology. Principles, Measurements and Applications*. Wiley-VCH. New York.

- ✓ Magaña, B.E., Ramírez, W.B., Platt, L.L.C., López, A.G.A., Torres, P.I., Sánchez, M.D.I. (2009). Caracterización viscoelástica de masas de variedades de trigos suaves. *Technol. Ciencia Ed (IMIQ)* 24 (1), 12-22.
- ✓ Maki, K.C., Dicklin, M.R., Cyrowsky, M., Umporowick, D.M., Nagata, Y., Moon, G., Forusz, S., Davidson, M.H. (2002). Improve calcium absorption from a newly formulated beverage compared with a calcium carbonate tablet. *Nutrition Research* 22: 1163-1176.
- ✓ Mitchell, J.R. (1980). The rheology of gels. *Journal of Texture Studies* 11:315-337.
- ✓ Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Marquez-Escalante, J., Gardea, A., Martínez-López, A., Guerrero, V. (2009). Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chemistry* 115, 1286-1290.
- ✓ NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos Alimenticios del maíz. Norma Mexicana. Secretaria de Fomento Industrial. Dirección de Normas.
- ✓ Nordin, B.E. (1997). Calcium and osteoporosis. *Nutrition*. 13: 664–86.
- ✓ Ochoa, A.P., y Viniegra, G.G. (2009). El nejayote, su tratamiento y su uso. Temas selectos de la cadena maíz-tortilla un enfoque multidisciplinario. Capítulo 10. Universidad Autónoma Metropolitana. México D.F.
- ✓ Paredes-López, O., Guevara-Lara, F. y Bello-Pérez, L.A. (2006). Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. Fondo de cultura Económica, México.
- ✓ Pflugfelder, R.L., Rooney, L.W., Waniska, R.D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chemistry* 65 (2), 127-132.
- ✓ Plascencia, J. (2004). Aflatoxins in maize: a Mexican perspective. *Journal of Toxicology. Toxin Reviews* 23, 155-177.
- ✓ Platt-Lucero, C. (2011). Efecto de la adición de Hidrocoloides y enzima xilanas en las propiedades viscoelásticas y texturales de la masa y tortilla a partir de harina de maíz extruida. Tesis de Doctorado. Instituto Tecnológico de Sonora. Ciudad Obregón, Sonora.
- ✓ Quintanar, G.A., Jaramillo, F.M.E., Escobedo, M.R., Chel, G.L., Solorza, F.J. (2009). Changes on the structure, consistency, physicochemical and viscoelastic

- properties of corn (*Zea mays* sp.) under different nixtamalization conditions. *Carbohydrate Polymers* 78 (4), 908-916.
- ✓ Ramírez-Romero, C.G., Ortega-Flores, J.L., Cornejo-Villegas, M.A., Reyes-Regalado, A., Ambriz-García, J.J. (2011). Eliminación de sólidos suspendidos de nejayote y manejo para su reutilización. *Memorias del Simposium Internacional sobre Tecnologías convencionales y Alternativas en el Procesamiento del Maíz*, Agosto, 219-224.
 - ✓ Ramírez, W.B., Sweat V.E., Torres P.I., Rooney L.W. (1993). Development of two instrumental methods for corn masa texture evaluation. *American Association of Cereal Chemistry* 70 (3), 286-290.
 - ✓ Rao, M.A., Steffe, J.F. (1992). *Viscoelastic properties of foods*. Elsevier, USA.
 - ✓ Rao, M.A. (1999). *Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and applications*. Aspen. Gaithersburg, Maryland. EEUU.
 - ✓ Reyes, C.P. (1990). *El maíz y su cultivo*. Ed. AGT Editor S.A. México, DF.
 - ✓ Reyes, M.O., Fernández, M.J., Ramírez, O.M.E. (2008). Análisis reológico de masa de maíz nixtamalizado. *Simposio de Tecnología Avanzada CICATA-IPN*, 57.
 - ✓ Robutti, L.J. (2003). *Calidad y usos del maíz*. Pergamino, Buenos Aires.
 - ✓ Rodríguez, S., Fernández, Q.E.A., Ayala A.A. (2005). *Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz*. *Ingeniería e Investigación*. Abril 72-78.
 - ✓ Rojas-Molina, I., Gutiérrez Cortéz, E., Palacios Fonseca, A., Baños, L., Pons-Hernández, J. L., Guzmán-Maldonado, S. H., et al. (2007). Study of structural changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalización process. *Cereal Chemistry* 84 (2), 304-312.
 - ✓ Rojas-Molina, I., Gutiérrez, E., Cortés-Acevedo, M.E., Falcón, A., Bressani, R., Rojas, A., Ibarra, C., Pons-Hernández, J.L., Guzmán-Maldonado, S.H., Cornejo-Villegas, A., Rodríguez, M.E. (2008). Analysis of quality protein changes in nixtamalized QPM flours as a function of the steeping time. *Cereal Chemistry* 85, 409-416.
 - ✓ Rojas-Molina, I., Gutiérrez, E., Rojas, A., Cortés-Álvarez, M., Campos-Solís, L., Hernández-Urbiola, M., Arjona, J.L., Cornejo, A., Rodríguez-García, M. (2009). Effect of temperature and steeping time on calcium and phosphorus content in

nixtamalized corn flours obtained by the traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry* 86 (5), 516–521.

- ✓ Rooney, L.W., y E.L. Suhendro. (1999). Perspectives on nixtamalization (alkaline cooking) of maize for tortillas and snacks. *Cereal Foods World* 44, 466-470.
- ✓ Rosentrater, K. A. (2006). A review of corn masa processing residues: Generation, properties, and potential utilization. *Waste Management* 26, 284-292.
- ✓ Rosenthal, A.J. (2001). *Textura de los alimentos: Medida y Percepción*. Ed. Acribia, S.A.Zaragoza, España.
- ✓ Rutuja, U., Debjani, G., Anurag, M. (2012). Characterization of bread dough: Rheological properties and microestructure. *Journal of Food Engineering* 109, 104-113.
- ✓ Salinas, M. Y., Martínez B. F., Gómez H. J. (1992). Comparación de métodos para medir la dureza del maíz (*Zea mays* L.). *Arch. Latín. Nutr.* 42: 59–63.
- ✓ Salmeron-Alcocer, A., Rodriguez-Mendoza, N., Pineda-Santiago, S., Cristiani-Urbina, E., Juarez-Ramirez, C., Ruiz-Ordaz, N., Galindez-Mayer, J. (2003). Aerobic treatment of maize processing wastewater (nejayote) in a single stream multistage reactor. *Journal of Environmental Engineering and Science* 2, 401-406.
- ✓ SE. Secretaria de Economía. (2010). Página oficial de la Secretaria de economía. <http://www.se.gob.mx>. Fecha de Consulta: 3 de Abril 2013.
- ✓ Serna-Saldivar, S. O., Knabe, D.A., Rooney, L. W., Tanksley, T.D. (1987). Effect of lime cooking on energy and protein digestibility of maize and sorghum. *Cereal Chemistry* 64, 247-252.
- ✓ Serna-Saldivar, S.O., Gómez, M.H., Rooney, L.W. (1990). The technology, chemistry and nutritional value of alkaline cooked corn products. Y. Pomeranz, ed. *Advances of cereal science and technology*, vol. 10. St Paul, MN, USA, American Association of Cereal Chemists.
- ✓ Serna-Saldivar, S.O., Gómez, M.H., Almeida-Domínguez, H.D., Islas Rubio, A., Rooney, L.W. (1993). A method to evaluate the lime cooking properties of corn (*Zea mays*). *Cereal Chemistry* 70. 762-764.
- ✓ Serna-Saldivar S.O. (1996). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los cereales*. AGT editor, S.A. México.

- ✓ SIAP/SAGARPA. (2008). Servicio de información y estadísticas agroalimentaria y pesquera (SIAP). <http://www.sagarpa.gob.mx>. Fecha de Consulta: 26 de Abril 2013.
- ✓ Steffe, J.F. (1992). *Rheological Methods in the Food Process Engineering*. Freeman Press: East Lancing. UK.
- ✓ Trejo-González, A; Feria-Morales, A. y Wild-Altamirano, C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn of tortilla production. Modifications of proteins; food, nutritional and pharmacological aspects. *Advances in Chemistry*. 24. 245-263.
- ✓ Twillman, T. J. y White, P. J. (1988). Influence of monoglycerides on the textural shelf life and dough rheology of corn tortillas *Cereal Chemistry* 65, 253–257.
- ✓ Urizar H.A. y Bressani, R. (1997). Efecto de la nixtamalización del maíz sobre el contenido de ácido fítico, calcio y hierro total disponible. *Archivo latinoamericano de Nutrición* 47 (7), 324-328.
- ✓ Valderrama-Bravo, C., Rojas-Molina, A., Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, I., Oaxaca-Luna, A., De la Rosa-Rincón, E., Rodríguez-García, M.E. (2010). Mechanism of calcium uptake in corn kernels during the traditional nixtamalization process: Diffusion, accumulation and percolation. *Journal of Food Engineering* 98, 126-132.
- ✓ Valderrama-Bravo, C. Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J.C., Rojas-Molina, A., Beristain, F., Rodríguez-García, M. E. (2012). Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize precessing. *Journal of Food Engineering* 110 (3), 478-486.
- ✓ Valencia G., Francia E., MILLAN C. Restrepo M. L., Carlos, Garces J.Y. (2007). Efecto de sustitutos de grasa en propiedades sensoriales y texturales del queso crema. *Revista Lasallista Investigación* (4), 20-26.
- ✓ Velasco-Martinez, M., Angulo, O., Vazquez, D.C., Arroyo, A.L., Monroy, J.R., (1997). Effect of dried solids of nejayote on broiler growth. *Poultry Science* 76, 1531-1534.
- ✓ Watson, S.A. y Ramstad, P. E. (1987). *Corn: chemistry and technology*. Cereal chemistry Inc. St. Paul, Minnesota, USA.