



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos

Programa de Maestría en Ciencias y Tecnología de Alimentos

Especialidad en Almacenamiento y Procesamiento de Granos

**Efecto de la Goma Xantana en las Características Viscoelásticas y
Texturales de la Masa y la Tortilla Elaboradas con Harinas Nixtamalizadas
de Maíz Obtenidas por el Proceso de Extrusión**

TESIS

Que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Luis Carlos Platt Lucero

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

TABLA DE CONTENIDO

Página

LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	4
General.....	4
Específicos.....	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
Origen del Maíz.....	5
Estructura del Grano de Maíz.....	6
Producción y Consumo del Maíz.....	8
Composición y Valor Nutricional.....	8
Almidón.....	9
Birrefringencia.....	9
Absorción de agua.....	9
Gelatinización.....	10
Retrogradación.....	10
Proteínas.....	10
Lípidos.....	11
Vitaminas.....	11
Minerales.....	11
Fibra Dietética.....	12
Procesos de Elaboración de Tortilla de Maíz.....	12
Tradicional.....	13
Harinas instantáneas.....	13
Proceso de Extrusión.....	17
Componentes de un extrusor.....	19
Mecanismos de alimentación.....	19
Tornillo.....	19
Camisa o cañón.....	21
Dado.....	21
Mecanismo de corte.....	22
Extrusión y la obtención de harinas Nixtamalizadas.....	22
Cambios que Ocurren Durante la Extrusión del Maíz.....	22
Hidrocoloides.....	27
Fuente.....	28
Derivados de algas.....	28
Agar.....	28
Carragenina.....	31
Alginatos.....	32

TABLA DE CONTENIDO (Cont...)

	Página
Derivados de semillas de plantas.....	32
Guar.....	32
Goma carob.....	33
Goma tara.....	33
Exudado de plantas	33
Goma arábica.....	34
Extractos de plantas.....	34
Pectina.....	34
Biosíntesis microbiana.....	36
Goma xantana.....	36
Gomas celulósicas.....	36
Carboximetilcelulosa.....	37
Hidrocolides Utilizados en Tortilla.....	37
Pruebas Reológicas Dinámicas.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS.....	46
Materia Prima.....	46
Maíz.....	46
Caracterización química.....	46
Molienda de Maíz.....	46
Proceso de Extrusión.....	47
Acondicionamiento.....	47
Extrusión.....	47
Descripción del equipo.....	47
Procedimiento.....	48
Expansión de los extrudidos.....	48
Obtención de las Harinas Nixtamalizadas Extrudidas	49
Evaluación de las Harinas.....	49
Humedad.....	49
Distribución del tamaño de partícula	49
Índice de tamaño de partícula	50
Índice de absorción de agua	51
Índice de material soluble.....	51
Capacidad de absorción de agua subjetiva.....	52
Color.....	52
Viscosidad Amilográfica.....	53
Evaluación de las Masas.....	53
Humedad.....	53
Propiedades viscoelásticas.....	53
Preparación de la muestra.....	53
Barridos dinámico oscilatorio.....	54
Elaboración de las Tortillas.....	54

TABLA DE CONTENIDO (Cont...)

	Página
Evaluación de las Tortillas.....	55
Características físicas	55
Propiedades texturales.....	55
Firmeza.....	56
Rollabilidad.....	56
Diseño Experimental y Análisis Estadístico.....	56
Optimización del Proceso de Extrusión.....	58
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
Caracterización de la Materia Prima.....	61
Expansión de los Extrudidos.....	61
Evaluación de las Harinas.....	65
Humedad.....	65
Distribución del tamaño de partícula.....	65
Índice de tamaño de partícula.....	71
Índice de absorción de agua.....	72
Índice de material soluble.....	75
Capacidad de absorción de agua subjetiva.....	76
Color.....	79
Luminosidad (L).....	79
Tendencia al amarillo (b).....	82
Viscosidad amilográfica.....	82
Temperatura final de gelatinización.....	86
Evaluación de las Masas.....	86
Humedad.....	86
Propiedades viscoelásticas	89
Evaluación de las Tortillas.....	96
Características físicas	96
Firmeza.....	99
Rollabilidad.....	104
Correlaciones entre las Diferentes Determinaciones.....	108
Modelos de Predicción para las Variables Respuesta.....	111
Índice de absorción de agua.....	111
Módulo de almacenamiento.....	114
Módulo de pérdida.....	116
Tangente del ángulo de fase.....	116
Fuerza máxima.....	118
Optimización del Proceso de Extrusión.....	121
CONCLUSIONES.....	123
RECOMENDACIONES.....	125
BIBLIOGRAFÍA.....	126

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Funciones de gomas en alimentos.....	29
2.	Combinaciones de temperatura de extrusión (TE) /humedad de acondicionamiento (HA)/concentración de goma (CG) utilizadas para la optimización del proceso de extrusión de maíz.....	57
3.	Composición química de maíz y de la harina comercial.....	62
4.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la expansión de los extrudidos de la harina de maíz.....	63
5.	Expansión de los extrudidos de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión	64
6.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la humedad de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	66
7.	Humedad de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión..	67
8.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la distribución de tamaño de partícula en las diferentes mallas e Índice de tamaño de partícula de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	68
9.	Material retenido en la distribución de tamaño de partícula en las diferentes mallas e índice de tamaño de partícula de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	69
10.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre índice de absorción de agua e índice de material soluble de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	73
11.	Índice de absorción de agua e índice de material soluble de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	74

LISTA DE TABLAS (Cont...)

Tabla		Página
12.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la capacidad de absorción de agua subjetiva en harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	77
13.	Capacidad de absorción de agua subjetiva en harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	78
14.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la luminosidad y tendencia al amarillo de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	80
15.	Luminosidad y tendencia al amarillo de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	81
16.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la viscosidad máxima y temperatura final de gelatinización en la harina de maíz nixtamalizada por extrusión...	83
17.	Viscosidad máxima y temperatura final de gelatinización de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	84
18.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la humedad de masa de harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	87
19.	Humedad en masas de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	88
20.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre las características viscoelásticas a 10 rad/s en masas de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.....	94
21.	Características viscoelásticas a 10 rad/s en masas de harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	95
22.	Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre las características físicas de la tortilla de harina de maíz nixtamalizada extrudida a las 2 h de almacenamiento.....	97
23.	Características físicas de la tortilla de harina de maíz nixtamalizada extrudida a las 2 h de almacenamiento.	98

LISTA DE TABLAS (Cont...)

Tabla	Página
24. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la fuerza máxima de la tortilla de harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	100
25. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la rollabilidad de las tortillas de harinas de maíz nixtamalizada por extrusión.....	105
26. Correlaciones simples (r) entre determinaciones realizadas a las harinas, masas y tortillas de maíz nixtamalizadas por extrusión...	109
27. Correlaciones simples (r) entre los módulos de almacenamiento y de pérdida de la masa con algunas determinaciones realizadas en harina de maíz extrudida, su masa y tortilla.....	110
28. Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos polinomiales de segundo orden mostrando la relación entre las variables respuesta y variables proceso.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Estructura del grano de maíz.....	7
2.	Proceso tradicional utilizado para elaborar tortillas.....	14
3.	Proceso industrial de producción de harinas nixtamalizadas de maíz.....	15
4.	Diagrama esquemático de un extrusor de tornillo simple.....	20
5.	Estructuras de gomas derivadas de algas: A) agar, B) carragenina-k y C) alginatos.....	30
6.	Estructura de las gomas pectina (A) y xantana (B).....	35
7.	Geometría de platos paralelos para pruebas dinámicas.....	41
8.	Deformación oscilatoria y esfuerzo de respuesta en pruebas dinámicas.....	43
9.	“Caja negra” del modelo matemático que muestra la relación entre variables de proceso y de respuesta del proceso de extrusión del maíz.....	59
10.	Módulo de almacenamiento en función de la frecuencia para las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida en los tratamientos del 1-10 (a) y 11-20 (b).....	90
11.	Módulo de pérdida en función de la frecuencia para las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida en los tratamientos del 1-10 (a) y 11-20 (b).....	91
12.	Tangente del ángulo de fase en función de la frecuencia para las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida en los tratamientos del 1-10 (a) y 11-20 (b).....	92
13.	Fuerza máxima en tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2h, 24h y 48h de almacenamiento a temperatura ambiente (25°C).....	101

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

Figura	Página	
14.	Rollabilidad en tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2h, 24h y 48h de almacenamiento a temperatura ambiente (25°C).....	106
15.	Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre el índice de absorción de agua (IAA) en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre el IAA; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p) y T sobre el IAA; (e y f) Efecto de GX y H sobre el IAA.....	113
16.	Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre el módulo de almacenamiento (G') en masas de harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre el G'; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p) y T sobre el IAA; (e y f) Efecto de GX y H sobre el G'.....	115
17.	Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre el módulo de pérdida (G'') en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre el G''; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p) y T sobre el G''; (e y f) Efecto de GX y H sobre el G''.....	117
18.	Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre la tangente del ángulo fase (tanδ) en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre la tanδ ; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p y T sobre la tanδ ; (e y f) Efecto de GX y H sobre la tanδ.....	119

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

Figura	Página
19. Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre la fuerza máxima (Fmax) en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre la Fmax ; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p) y T sobre la Fmax ; (e y f) Efecto de GX y H sobre la Fmax.....	120
20. Regiones de mejores combinaciones de las variables proceso para la producción óptima de harina de maíz extrudida con un extrusor de tornillo simple.....	122

RESUMEN

La tortilla de maíz es un alimento de primera necesidad principalmente para México, y los procesos para producirla a nivel comercial son el tradicional y utilizando harinas nixtamalizadas, sin embargo ambos procesos producen aguas residuales denominadas como nejayote, el cual es muy contaminante. Un proceso alternativo que no produce contaminantes es la extrusión y ya se ha utilizado para elaborar harinas nixtamalizadas y después tortillas. Sin embargo, las tortillas producidas han tenido mayor firmeza y menos rollabilidad que las obtenidas con los dos procesos comerciales mencionados anteriormente. Una alternativa para mejorar la textura de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizado por extrusión (HMNE) es el uso de gomas que puedan mejorar su flexibilidad. El objetivo de esta investigación fue evaluar las características viscoelásticas y texturales de la masa y la tortilla elaboradas con harinas nixtamalizadas de maíz obtenidas por el proceso de extrusión, a diferentes concentraciones de goma xantana, contenido de humedad de acondicionamiento de la harina y temperatura de la última zona de calentamiento del extrusor. Se utilizó maíz blanco comercial, y para comparación harina nixtamalizada, masa y tortilla comercial. Primeramente, el maíz se molió a un tamaño de partícula de 0.5 mm; se acondicionó con cal al 0.3% (p/p) a una humedad en un intervalo de 21.6 a 38.4%, y goma xantana en el intervalo de 0.16 a 0.85% (p/p). Las muestras se dejaron reposar durante 12 h a 25°C. Después fueron extrudidas en un intervalo de temperatura de 103.2-136.8 °C en un extrusor simple a una velocidad de tornillo de 112 rpm. El extrudido fue secado a 50°C y molido para obtener la HMNE. A las harinas se les determinó la distribución del tamaño de partícula (DTP), índice de tamaño de partícula (ITP), índice de absorción de agua (IAA), índice de material soluble (IMS), capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS), color y viscosidad máxima (μ_{max}). Para obtener las masas, se les adicionó agua de acuerdo a la CAAS, y luego se les determinó su humedad (HUMA) y sus propiedades viscoelásticas: módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y tangente del ángulo de fase ($Tan \delta$), aplicándose un barrido de frecuencia de 0.1 a 100 rad/s. Las tortillas fueron

elaboradas a nivel comercial y almacenadas por 2h, 24h y 48 h a temperatura ambiente y se les evaluó la fuerza máxima (F_{max}) y rollabilidad (Roll). Se aplicó la metodología de superficie de respuesta para determinar las condiciones óptimas del proceso, utilizando las variables respuestas IAA, F_{max} , Roll y las propiedades viscoelásticas a 10 rad/s. El ITP y la CAAS presentaron valores menores que la harina comercial. El IAA, CAAS y μ_{max} fueron afectados por la concentración de goma xantana, tal como se observó en los tratamientos 13 ($T=120^{\circ}C$, $H=30\%$, $GX=0.16\%$) y 14 ($T=120^{\circ}C$, $H=30\%$, $GX=0.84\%$), esto debido a las características propias de las gomas. Por otro lado, se observó que el G' y G'' de las masas incrementaron con la frecuencia, lo que significa que estos parámetros reológicos son dependientes de este factor. Las masas mostraron valores bajos de $\tan \delta$, indicando que presentaron una parte más elástica que parte viscosa. La mayoría de las masas de los tratamientos mostraron parámetros viscoelásticos similares a las masas comerciales. G' y G'' tuvieron correlaciones con el IAA, la CAAS, HUMA, F_{max} y rollabilidad de la tortilla durante su almacenamiento. Masas que presentaron un menor valor de G' y G'' mostraron altos IAA, CAAS y HUMA con menor fuerza máxima y una mayor rollabilidad. La fuerza máxima para romper las tortillas de HMNE fueron mayores que la de tortillas hechas de harina comercial. La rollabilidad no presentó diferencia significativa a las 2 h con las tortillas control. En cuanto al efecto de las variables respuesta IAA, G' , G'' y F_{max} como una función de T , H y GX , se observó que el coeficiente cuadrático de la humedad de los modelos de predicción fue muy significativo ($p \leq 0.01$), así como el coeficiente cuadrático de goma xantana en la variable $\tan \delta$. Las mejores combinaciones de las variables del proceso fueron: $T=118.78^{\circ}C$ / $H= 30.92\%$ (p/p) / $GX = 0.61\%$ (p/p). La goma xantana muestra ser una alternativa para la producción de tortillas de HMNE con características texturales y de flexibilidad aceptables.

INTRODUCCION

El maíz ha sido alimento, moneda y religión para el pueblo de México. Para los antiguos mexicanos el maíz era un cultivo sagrado, regalo de los dioses, partícipe de la creación componente indispensable de ritos y ceremonias, de cuentos y leyendas. El maíz es originario del continente americano, específicamente de Mesoamérica, aunque su domesticación pudo realizarse en forma autónoma en varios puntos del continente. Evidencias arqueológicas en Michoacán, Tamaulipas, Tehuacan y el Valle de Oaxaca ponen de manifiesto el proceso de domesticación del maíz en México. Los primeros cultivos datan de hace unos 8000 años (Museo Nacional de Culturas Populares, 1987).

La producción mundial de maíz en el 2004 fue de 721.4 millones de ton, de los cuales Estados Unidos de América (EUA), China, Brasil, México y Francia son los productores más importantes. México obtuvo una producción de 19.8 millones de toneladas de maíz (INEGI, 2005) y se estima un consumo promedio de 27.2 millones de toneladas, del cual aproximadamente el 50 % es destinado para consumo humano (industrias de harinas nixtamalizadas e industria de la molienda), el 30 % para consumo animal, 6% para la industria transformadora, 1.0 % para semillas y 0.5 % por mermas (FAO, 2003).

En México, la tortilla de maíz es el principal alimento ancestral y su consumo per cápita es de aproximadamente 120 kg (Martínez, 2004). Las tortillas son usadas en la preparación de alimentos tradicionales mexicanos como: enchiladas, tacos y chalupas. Se considera a la tortilla como un producto de alto valor nutritivo, ya que contiene la calidad y cantidad de proteínas, así como, una cantidad significativa de calcio, fósforo y hierro (Saldaña y Brown, 1984).

La tortilla puede ser producida a partir de masa fresca, usando la nixtamalización tradicional a partir de granos de maíz enteros cocidos en agua y cal y molidos o de harina de maíz instantánea (HMI) que es una masa

deshidratada. La HMI ha llegado a ser utilizada por que no se requiere el trabajo intensivo y tedioso del proceso tradicional para la producción de tortillas, y puede ser almacenada por largos tiempos sin afectar su calidad (Arámbula, 1999). En ambos procesos se cuenta con efluentes industriales consistentes en pericarpio, material soluble, cal y agua o bien conocido como nejayote (Serna-Saldivar, 1996). La extrusión es una tecnología alterna de la nixtamalización tradicional y de la harina de maíz comercial para la elaboración de tortillas a partir de harinas de maíz extrudidas, ya que una de las características por la cual ha ganado popularidad es que no produce efluentes contaminantes (Harper, 1989), procesando el grano de maíz integral acondicionado a tiempos y temperaturas controladas.

De acuerdo a investigaciones previas (Arámbula *et al.*, 1998; Arámbula *et al.*, 2002; Gómez y Aguilera, 1983; Galicia 2005; González, 2006) en donde se han elaborado tortillas muy duras con harina de maíz extrudida, la firmeza ha sido alta con pobre rollabilidad durante el almacenamiento por lo que es necesario mejorar la textura de las tortilla por esta tecnología y una alternativa es el uso de hidrocoloides o gomas, que son ingredientes multifuncionales que le agregan flexibilidad. Dentro de los principales hidrocoloides utilizados en tortilla se encuentran la Carboximetilcelulosa (CMC), goma guar, alginatos, carrageninas y goma xantana (Gurkin, 2002). Ya que éstas, inhiben la retrogradación del almidón gelatinizado al ser enfriado (Yau *et al.*, 1994).

A la fecha son escasas las investigaciones en la elaboración de tortillas de maíz a partir de harina extrudida con hidrocoloides o gomas tales como la de Arámbula (1999), que aplicó pruebas texturales solamente en producto fresco, sin observar su comportamiento durante su almacenamiento; estudió el efecto de 4 gomas, de las cuales obtuvo buenos resultados en las características texturales de la tortilla al utilizar la goma xantana antes de la extrusión.

En la actualidad, uno de los métodos más frecuentemente utilizados para el estudio de las propiedades viscoelásticas de las masas es el conocido como método dinámico, adaptado de técnicas utilizadas en el estudio de los polímeros. En las pruebas dinámicas se obtienen como resultados parámetros bien definidos como los módulos de elasticidad y viscosidad, que ayudan a lograr una caracterización adecuada de materiales cuyo comportamiento reológico es complejo (Faubion y Hosenev, 1990). Actualmente se cuenta con estudios solamente en masas de trigo (Masi *et al.* 1988; Safari-Ardi y Phan-Thien, 1988; Schuluentz *et al.*, 2000). Este método podría ser una herramienta para conocer el efecto de las gomas en las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida.

La metodología de superficie de respuesta es una técnica estadística usada para la investigación de procesos complejos y se ha aplicado de manera satisfactoria para optimizar las condiciones en distintas disciplinas como la agricultura, la ingeniería química y el desarrollo de productos alimenticios. Para estimar una superficie de respuesta, los modelos lineales de orden menor o igual a tres se han empleado con frecuencia por su sencillez y fácil interpretación (Briones-Encinia *et al.*, 2002). El proceso de elaboración de harina instantánea por extrusión puede ser optimizado mediante el uso de los gráficos de superficie (Galicia, 2005; Milán-Carrillo *et al.* 2002).

Por lo anterior es importancia estudiar el efecto de algunas las variables de proceso como son la humedad de la muestra acondicionada, la temperatura de extrusión y la concentración de la goma xantana en las propiedades físicas, químicas y reológicas de la harina obtenida, así como la masa y tortilla elaborada con esta harina y mediante la técnica de optimización obtener la mejor combinación de los tratamientos, buscando así igualar o mejorar la textura de la tortilla elaborada con harina de maíz comercial.

OBJETIVOS

General

Evaluar las características viscoelásticas y texturales de la masa y la tortilla elaboradas con harinas nixtamalizadas de maíz obtenidas por el proceso de extrusión, a diferentes concentraciones de goma xantana, contenido de humedad de acondicionamiento de la harina y temperatura de la última zona de calentamiento del extrusor.

Específicos

1. Obtener harinas de maíz nixtamalizadas mediante el proceso de extrusión a diferentes concentraciones de goma xantana, humedad de la harina acondicionada y temperatura del tornillo en el extrusor a partir de maíz comercial.
2. Determinar las propiedades físicas, químicas y reológicas de las harinas nixtamalizadas obtenidas por el proceso de extrusión.
3. Evaluar las propiedades viscoelásticas de las masas elaboradas con harinas de maíz nixtamalizadas obtenidas por el proceso de extrusión.
4. Determinar las características físicas y texturales de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizada obtenida por el proceso de extrusión.
5. Determinar las condiciones óptimas del proceso de extrusión para obtener las mejores características físicas, viscoelásticas y texturales de la harina, masa y tortilla respectivamente, tomando como comparación harina y masa de maíz nixtamalizada comercial.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Origen del Maíz

El maíz ha sido alimento, moneda y religión para el pueblo de México. Para los antiguos mexicanos el maíz era un cultivo sagrado, regalo de los dioses, partícipe de la creación componente indispensable de ritos y ceremonias, de cuentos y leyendas. Elemento que unía a la Tierra con el universo. Dicho en palabras de los mayas “La sangre vital del cosmos fluye a través de una frondosa planta de maíz” (Museo Nacional de Culturas Populares, 1987). Sin embargo, el origen y la evolución del maíz han sido un misterio porque éste ha llegado a nosotros altamente evolucionado, sin conocerse formas intermedias. A pesar de extensivas búsquedas de las formas silvestres de esta planta, no ha sido encontrada alguna (Figueroa –Cárdenas y Aguilar –García, 1997).

Desde hace más de 100 años diversas teorías han sido expuestas para explicar el origen y la evolución del maíz. Las hipótesis principales son: (1) el maíz se origina del maíz tunicado (*Zea mays* var. *tunicata*), forma primitiva del maíz en que los granos están individualmente cubiertos por una gluma o por bráqueas como ocurre en los cereales y en la mayoría de los pastos; (2) La teoría del teocintle y algunas de sus variantes, la cual sugiere que el maíz desciende directamente de sus parientes más cercanos, el teocintle (*Euchlaema mexicana*, ahora *Zea mexicana*), por selección directa, por mutación o por la cruce del teocintle con algún pasto desconocido y actualmente extinto; (3) La teoría de que el maíz, el teocintle y el *Tripsacum* (teocintle guatemalteco) descienden por líneas independientes directamente de un ancestro común; y (4) La teoría tripartita donde (a) el maíz cultivado se origina del maíz tunicado; (b) el teocintle es un híbrido de la cruce entre maíz y *Tripsacum* y (c) la mayoría de las modernas variedades de maíz son producto de mezclas con teocintle, *Tripsacum* o con ambos (Mangelsdorf, 1986). De cualquier forma, después de 8000 años de coevolución el maíz es producto del trabajo de los americanos quienes fundaron sus culturas

sobre la base de este cultivo, no en vano se llaman a sí mismos, "La gente de maíz" (Museo Nacional de Culturas populares, 1987).

Todo indica que el maíz es originario del continente americano, específicamente de Mesoamérica, aunque su domesticación pudo realizarse en forma autónoma en varios puntos del continente. Evidencias arqueológicas en Michoacán, Tamaulipas, Tehuacan y el Valle de Oaxaca ponen de manifiesto el proceso de domesticación del maíz en México. Los primeros cultivos datan de hace unos 8 000 años (Museo Nacional de Culturas Populares, 1987).

Estructura del Grano de Maíz

El grano de maíz botánicamente se denomina cariósipide o cariopsis (baya seca con una semilla) en el cual la cubierta y la semilla de la fruta se fusionan para formar un simple grano. Los granos maduros contienen cuatro estructuras físicas fundamentales (Fig. 1): (1) El pericarpio (cáscara o salvado) que es una capa de células fibrosas que está cubierta por la cutícula, la cual es una capa impermeable cerosa que recubre al grano. El pericarpio constituye cerca del 5.3 % del peso del grano; (2) El germen es considerado el primer tejido de reserva del grano, es escutelo y el embrión son sus partes principales, el escutelo representa cerca del 90 % del germen y almacena los nutrientes utilizados durante la germinación, además almacena la mayoría de los lípidos del grano de maíz. En esta estructura se originan el tallo o plúmula y las raíces o radícula y representa el 11.5 % del peso del grano; (3) El endospermo presenta un alto contenido de almidón y es el segundo tejido de reserva del grano, su capa exterior es una capa de aleurona la cual contiene células con gránulos ricos en proteína y minerales, así como pigmentos que hacen que los granos de ciertas variedades presenten diversos colores (azul, negro o púrpura). Esta estructura se ha clasificado en

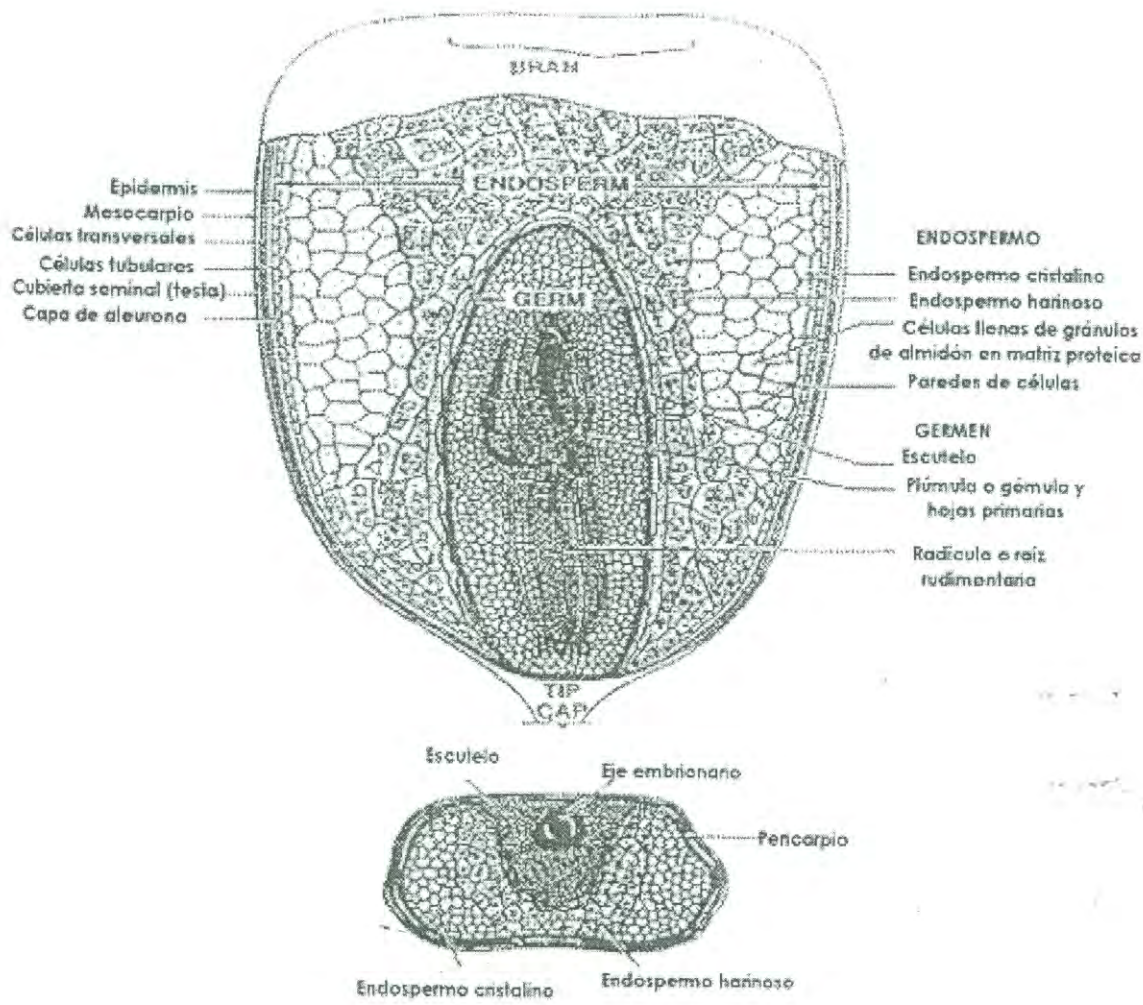


Figura 1. Estructura del grano de maíz.

Fuente: Watson (1987).

endospermo vítreo y ceroso y puede presentar una consistencia suave o harinosa. Los gránulos de almidón de sus células, que presentan una forma elipsoidal y angular (poligonales, hexagonales), están cubiertos por una matriz proteínica con pequeños cuerpos de la misma naturaleza incrustados en la superficie. El endospermo en la parte inferior del grano, los lados del germen, también presenta dos zonas ricas en proteínas que contienen, además, pequeños gránulos de almidón. El endospermo representa el 83 % del peso del grano y (4) El pedicelo o capa terminal es la continuación del pericarpio y permite la unión del grano con el olote. Esta estructura es responsable de la absorción de líquidos del pedicelo al pericarpio (Watson y Ramstad, 1987).

Producción y Consumo del Maíz

El maíz (*Zea mays* L) se ubica entre los más antiguos de los cereales. Es el tercero en importancia en el mundo en términos de producción mundial (28.8% de la producción total de cereales), después del trigo y arroz (FAO, 2003). La producción mundial de maíz en el 2004 fue de 721.4 millones de ton, de los cuales Estados Unidos de América (EUA), China, Brasil, México y Francia son los productores más importantes. México obtuvo una producción de 19.8 millones de toneladas de maíz (INEGI, 2005), y se estima un consumo promedio de 27.2 millones de toneladas, del cual aproximadamente el 50 % es destinado para consumo humano (industrias de harinas nixtamalizadas e industria de la molienda), el 30 % para consumo animal, 6% para la industria transformadora, 1.0 % para semillas y 0.5 % por mermas (FAO, 2003).

Composición y Valor Nutricional

El maíz es una de las fuentes más importantes de energía y proteínas y otros nutrimentos para seres vivos y ganado en el mundo, especialmente en

países en vías de desarrollo. Su composición química difiere por diversos factores como la variedad, localización geográfica y las condiciones de crecimiento (Paredes-López *et al.*, 2000).

Almidón

El componente principal del grano de maíz es el almidón el cual presenta un promedio de 71.5% del peso del grano y prácticamente todo está en las células del endospermo (Paredes-López *et al.*, 2000). El almidón está formado por dos polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina. La amilosa es una molécula esencialmente lineal formada por aproximadamente 1,000 unidades de glucosa. La amilopectina es una molécula que presenta forma ramificada que posee aproximadamente 40,000 unidades de glucosa. En un maíz normal, el gránulo de almidón contiene aproximadamente 27% de ^{lineal} amilosa y 73% de ^{ramificada} amilopectina (Inglett, 1970). El almidón presenta propiedades como: birrefringencia, absorción de agua, gelatinización y retrogradación.

Birrefringencia. Un cuerpo presenta birrefringencia cuando refracta la luz polarizada (Zobel 1988). La mayoría de los gránulos de almidón vistos bajo luz polarizada muestran un grado de birrefringencia, apreciándose con la típica cruz de malta, debido a una orientación regular de las unidades D-glucosa en regiones amorfas y cristalinas. La propiedad de birrefringencia es debida al alto grado de estructuración del gránulo de almidón, lo cual se aprecia con la típica cruz de malta. Durante el calentamiento que ocurre en el proceso de elaboración de la tortilla, se pierde la birrefringencia en algunos gránulos de almidón, esta pérdida está relacionada con la gelatinización (Hoseney, 1991).

Absorción de Agua. El almidón absorbe agua hasta alcanzar el equilibrio con el medio circundante y el proceso es reversible cuando el agua es fría, en presencia de agua caliente la absorción es función de la elasticidad y fuerza que presenta la amilopectina en unión con la amilosa siendo por consiguiente una absorción

limitada, es decir, si dichos enlaces son hidrolizados el proceso es irreversible. Cuando el gránulo no es fragmentado podrá recobrar su forma y humedad inicial siendo reversible cuando la temperatura del agua es inferior a la temperatura de gelatinización (Robles, 1986).

Gelatinización. La gelatinización es el rompimiento de los órdenes moleculares dentro del gránulo de almidón, manifestado en cambios irreversibles en las propiedades de hinchamiento granular, fusión de la cristalinidad nativa, pérdida de birrefringencia, pérdida del patrón de difracción de rayos X, solubilización del almidón y un incremento de viscosidad (White *et al.*, 1990).

Retrogradación. Es un proceso que ocurre cuando las moléculas previamente gelatinizadas de almidón comienzan a reasociarse en una estructura ordenada formando un gel rígido a partir de una suspensión de almidón fría que previamente fue gelatinizado (Atwell *et al.* 1988). Al enfriar una solución de almidón se forma un gel, el cual es considerado como cadenas de almidón con capas de moléculas de agua retenidas por puentes de hidrógeno. Al enfriarse esta solución, las cadenas van perdiendo energía y los enlaces de hidrógeno se hacen más fuertes. Al envejecer el gel o si se congela y descongela, las cadenas de almidón tienden a interactuar fuertemente entre sí, forzando al agua a salir del gel (sinéresis), y éste se vuelve más rígido. El endurecimiento de productos horneados y productos que contienen altas cantidades de almidón en su composición se le ha atribuido al proceso de retrogradación (Hoseney, 1991).

Proteínas

El maíz contiene un 10.3% de proteína en el grano completo (Paredes-López *et al.*, 2000). Las proteínas predominantes en el maíz son una familia de prolaminas almacenadas solubles en alcohol llamadas zeínas, las cuales se acumulan en los cuerpos proteínicos del endospermo del grano durante su desarrollo (Lending y Larkins, 1989).

El endospermo de maíz contiene el 75 % del total de las proteínas que se encuentran en el grano entero, que son principalmente proteínas insolubles a las que se les atribuye la dureza del endospermo (Watson, 1987).

Lípidos

El contenido de lípidos del maíz representa aproximadamente el 4.8% del peso total del grano y éstos se encuentran localizados en su mayor parte en el germen. El aceite de maíz, como la mayoría de aceites de origen vegetal, contiene bajos niveles de grasas saturadas. El contenido de ácidos grasos saturados (ácido palmítico y esteárico) es bajo en comparación con los ácidos grasos polinsaturados, principalmente oleico y linoleico, los cuales representan la mayoría del total de los lípidos contenidos en el maíz (Paredes-López *et al.*, 2000)

Vitaminas

El grano de maíz amarillo contiene principalmente dos vitaminas solubles en grasa, β -caroteno o provitamina A y α -tocoferol o vitamina E y la mayoría de las vitaminas solubles en agua (Paredes-López *et al.*, 2000). El maíz amarillo es una buena fuente de provitamina; sin embargo, ésta se pierde durante el almacenamiento prolongado. Por otro lado, el contenido de niacina en el grano de maíz es muy alto en comparación con los requerimientos mínimos, pero no está presente en forma disponible para ser asimilada por el cuerpo humano (Watson, 1987).

Minerales

La concentración de minerales en el grano de maíz es aproximadamente de 1.4%. Donde el 78% de éstos están contenidos en el germen del grano,

probablemente porque son esenciales durante el crecimiento del embrión. El mineral que más abunda es el fósforo. Éste está presente principalmente en las sales de potasio y magnesio del ácido fítico. Este compuesto, que llega a presentar hasta el 1% del peso del grano, interfiere en la absorción intestinal más abundante en el grano, está contenido en forma orgánica como parte de los aminoácidos metionina y cisteína (Watson, 1987).

Fibra dietética

La fibra dietética es el componente químico del maíz que se halla en un 9.8% del grano entero. Se encuentra en el pericarpio y el pedicelo, aunque también en las paredes celulares del endospermo y, en menor medida, en las del germen (Watson, 1987).

Procesos de Elaboración de Tortilla de Maíz

En México, la tortilla de maíz es el principal alimento ancestral y su consumo per cápita es de aproximadamente 120 kg (Martínez, 2004). Las tortillas son usadas en la preparación de alimentos tradicionales mexicanos como: enchiladas, tacos y chalupas. Se considera a la tortilla como un producto de alto valor nutritivo, ya que contiene la calidad y cantidad de proteínas, así como, una cantidad significativa en calcio, fósforo y hierro (Saldaña y Brown, 1984).

La tortilla puede ser producida a partir de masa fresca usando la nixtamalización tradicional a partir de granos de maíz enteros cocidos en agua y cal y molidos o de harina de maíz instantánea (HMI) que es una masa deshidratada. La HMI ha llegado hacer utilizada por que no se requiere el trabajo intensivo y tedioso del proceso tradicional para la producción de tortillas y puede ser almacenada por largos tiempos sin afectar su calidad (Arámbula, 1999). En

ambos procesos se cuenta con efluentes industriales consistentes en pericarpio, material soluble, cal y agua o bien conocido como nejayote (Serna-Saldivar, 1996).

Tradicional

El proceso (Fig. 2) como se lleva a cabo en México involucra la adición de una parte de maíz por tres partes de una solución de cal al 1%. La mezcla se calienta a 80°C entre 20 a 45 minutos y entonces se deja en reposo de 8 a 12 horas. Después, el licor de cocimiento se decanta y el maíz cocido y remojado, ahora referido como nixtamal, se lava dos o tres veces con agua removiendo la cubierta de la semilla, el pedicelo, el exceso de cal, y cualquier otra impureza del grano. La adición de cal en las etapas de cocimiento y remojado ayuda a la remoción de la cubierta de la semilla del grano. Posteriormente, el nixtamal se muele formando una pasta llamada "masa", la cual se moldeara en tortillas. Éstas se preparan con una cantidad aproximada de 35 a 50 g de masa que es prensada hasta formar discos delgados circulares. Estos discos se cosen por ambos lados sobre una plancha caliente de barro por espacio de 75 a 100 segundos. Una vez cocidas las tortillas, se remueven de la plancha, se colocan en una canasta y se cubren con una manta para que permanezcan blandas y calientes. (Serna-Saldivar, 1996).

Harinas instantáneas

En los últimos años, un método para elaborar tortillas y productos similares ha sido completamente popular en México. Se basa en el uso de harina de maíz preparada industrialmente (Fig. 3) Esto representa un producto conveniente para las fábricas pequeñas de tortillas, con la cual simplifican grandemente la preparación de tortillas y otros de este tipo (Paredes-López y Saharopoulos-Paredes, 1983).

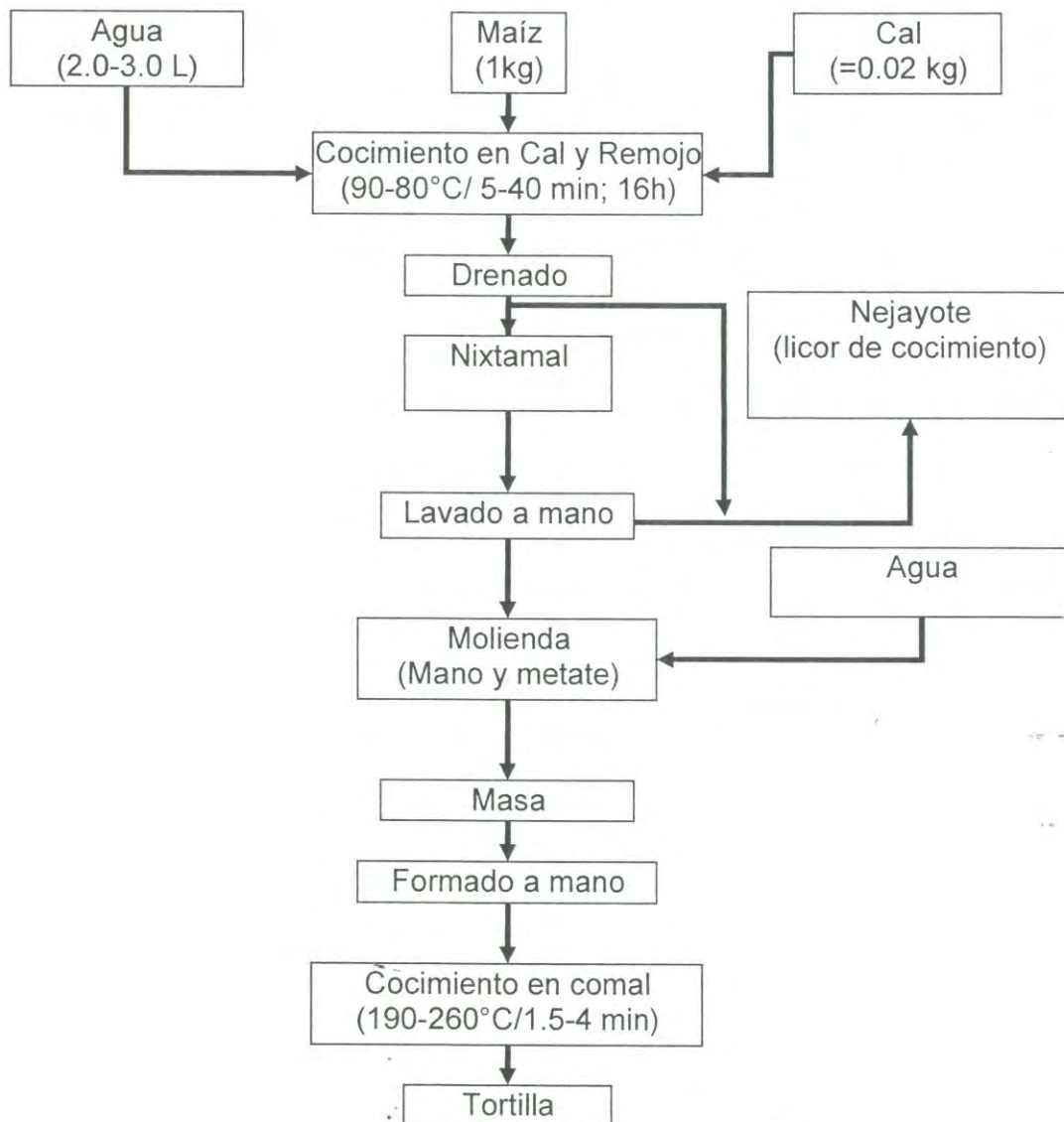


Figura 2. Proceso tradicional utilizado para elaborar tortillas de maíz.

Fuente: Serna-Saldivar (1996)

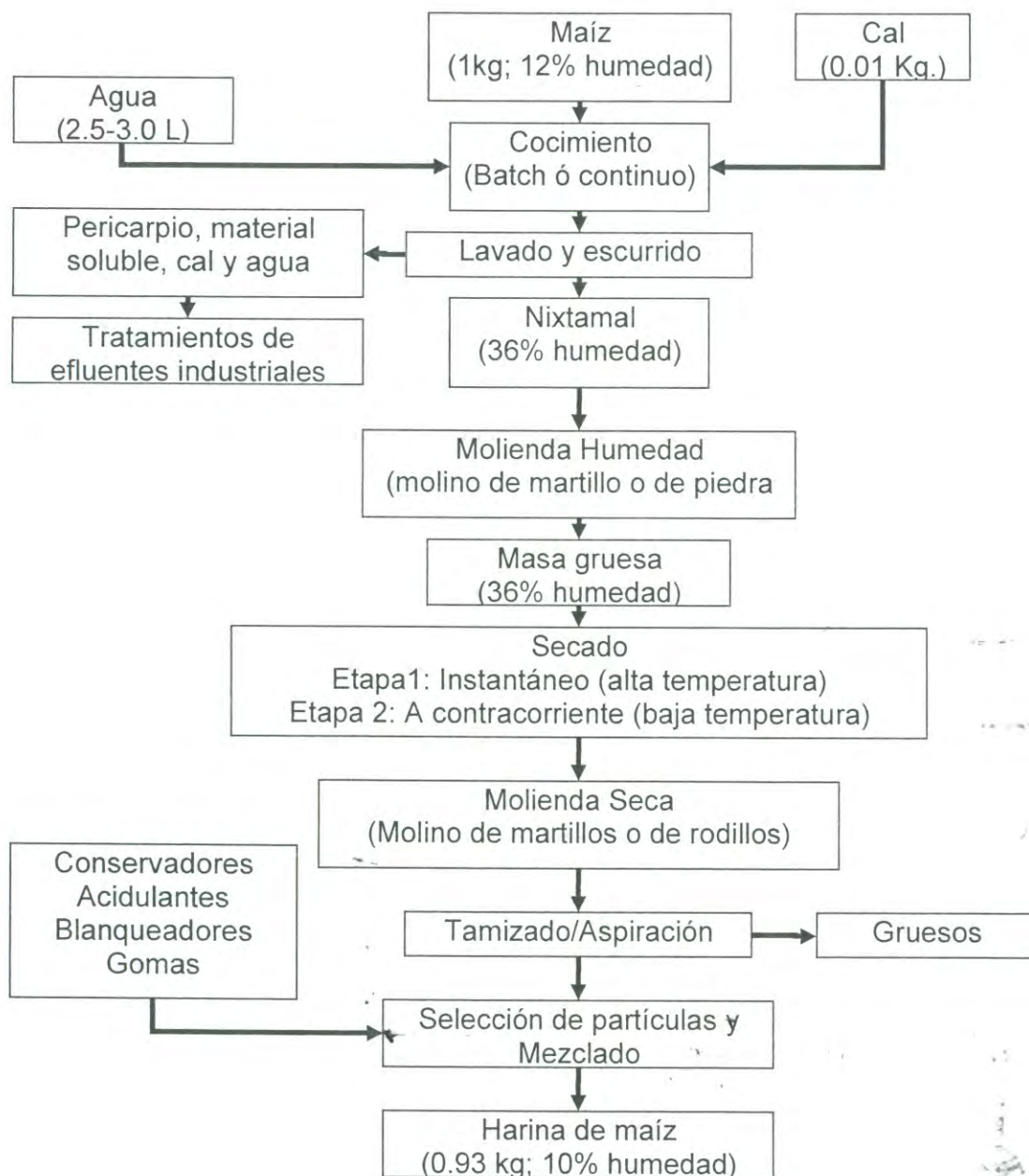


Figura 3. Proceso Industrial de producción de harinas nixtamalizadas de maíz.

Fuente: Serna-Saldivar (1996).

Las harinas de masa son algunas veces referidas erróneamente como harinas de maíz. Estas pueden ser preparadas por cocimiento del maíz en cal (nixtamalización) antes que sea molido y secado. Así, la harina de masas considerablemente diferente de las harinas de maíz obtenidas por molienda seca. La producción de harinas de maíz nixtamalizado se han extendido significativamente durante los últimos años por que estas requieren 30 minutos comparada con 12- 24 horas de cocimiento, remojado y molienda del maíz. La harina de masa seca fue desarrollada en México, donde dos o más plantas de procesamiento producen aproximadamente 10% de la masa usada. En Estados Unidos, existen solamente seis compañías produciendo harina de masa seca (Gómez *et al.*, 1989).

Las harinas de masa son hechas por preparación de la masa de maíz fresco en alguna forma y entonces secada, molida, cernida y mezclada para producir un producto con una vida estable con un tamaño de partícula deseable, color, pH y sabor (Gómez *et al.*, 1989).

Hoy en día, la evolución propia de los mercados, en conjunto a un notorio cambio en los hábitos de compra, consumo y vida de nuestro consumidor, ha ido propiciando una generación de nuevas tendencias, que es importante estudiar con el fin de aprender cuales son estas nuevas necesidades y entonces planear como deberán atenderse con el propósito de seguir siendo altamente competitivos en el mercado. Estas tendencias señalan principalmente al desarrollo de productos (tradicionales y novedosos); esto es, alimentos con mejores atributos (su apariencia, color, aroma, sabor, aporte nutrimental, textura, palatabilidad, elasticidad, suavidad, resistencia, maquinabilidad, vida de anaquel), optimizando e innovando aquellos procesos tradicionales de manufactura con los que han sido y son elaborados actualmente (Fonseca, 2004).

En el caso específico de la industria de la masa de nixtamal, la tortilla y todos aquellos productos derivados de este tipo de maíz, se sabe que las prioridades señalan hacia la realización de estudios enfocados a mejorar básicamente tres parámetros (Fonseca, 2004):

- a) Calidad (en toda la extensión de la palabra)
- b) Rendimiento (producir/vender mayor volumen)
- c) Rentabilidad (generar ganancias, sin exceder costos)

Estos y otros objetivos pueden alcanzarse gracias al uso inteligente y moderado de diversos tipos de aditivos tanto en la formulación, como en el proceso tradicional de nixtamalización; de tal manera que actualmente es una práctica común adicionar una serie de aditivos tales como hidrocoloides y emulsificantes para modificar la reología normal de la masa y así mejorar significativamente la retención de agua tanto en la masa, como en la tortilla. Este nuevo balance de sólidos-humedad tanto en producto en proceso, como en producto terminado va a contribuir a brindarle una mayor suavidad, durabilidad y mejores características a la tortilla por un tiempo mayor al logrado con una tortilla estándar (sin uso de aditivos), y no obstante dicha tortilla sea recalentada tanto en comal, como utilizando horno de microondas algunos días después de elaborada (Fonseca, 2004).

Proceso de Extrusión

La extrusión aplicada a alimentos puede ser definida como un proceso continuo en donde se combina el corte mecánico con el calor para obtener la gelatinización del almidón y la desnaturalización de las proteínas, obteniéndose un producto plastificado y reestructurado con nuevas formas y texturas. Además el extrusor se considera un reactor de tornillos por las transformaciones físicas,

químicas y bioquímicas que ocurren en el material en donde al mismo tiempo se llevan funciones de transporte, mezclado, orientación y formado del material a presión y temperatura controladas (Harper, 1989).

Los extrusores se pueden categorizar en tres tipos principales: pistón, rodillos y tornillo. Los extrusores de pistón, los más simples en diseño, se utilizan principalmente para dar forma a un material determinado. Consisten de un pistón o una batería de pistones, los cuales depositan cantidades muy precisas de material en una banda transportadora. Estas máquinas son comúnmente usadas en la industria de la confitería, por ejemplo, para depositar el centro de relleno en los chocolates (Dziezak, 1989). Los extrusores de rodillos, utilizados también como dispositivos para dar forma, consisten de dos rodillos contra-rotatorios que giran a velocidades iguales o diferentes y que tienen superficies lisas o perfiladas. El claro entre los rodillos puede cerrarse para comprimir el material que pasa a través de la unidad, o bien el extrusor se fábrica en una variedad de configuraciones y con capacidad para formar cilindros rellenos o placas. Los extrusores de tornillo, denominado de la tercera categoría, constan de tornillos sencillos, dobles o múltiples, los que rotan en el interior de un cañón estacionario para empujar el material hacia y a través de un orificio de diseño especial, llamado dado. Se selecciona cuidadosamente una variedad de parámetros tales como la configuración del tornillo, su velocidad y la temperatura en las diferentes zonas del cañón, dependiendo de la influencia deseada en la función de la extrusión (Dziezak, 1989).

El propósito principal de la extrusión es incrementar la variedad de alimentos en la dieta mediante la producción de un rango amplio de productos con diferentes formas, texturas, colores y sabores de ingredientes básicos. El principal método de preservación de los alimentos extrudidos en frío y en presencia de calor es la baja actividad de agua del producto. Algunas de las características por las cuales la extrusión ha ganado popularidad son: Versatilidad, costos reducidos, alta productividad, productos de alta calidad, diferentes formas

del producto, eficiencia energética, generación de nuevos productos y ausencia de efluentes (Harper 1989).

Componentes de un extrusor

Un extrusor esta formado de cinco componentes principales: Mecanismo de alimentación, tornillo y su mecanismo de conducción, camisa o cañón, dado o restrictor de flujo y mecanismo de corte. Además, incluye algunos otros componentes accesorios como se observa en la Fig. 4. A continuación se describen brevemente los componentes principales de un extrusor (Harper, 1989).

Mecanismo de alimentación. Esta sección está generalmente compuesta por una tolva para recibir el material a ser extrudido y de un tornillo alimentador, localizado horizontal o verticalmente. Para permitir un mejor flujo el alimentador está equipado con un agitador que ayuda a mantener constante la alimentación lo cual es esencial para el funcionamiento adecuado del extrusor y homogeneidad en la calidad del producto extrudido.

Tornillo. Es el componente principal de un extrusor, no solo porque gobierna el grado de cocimiento y gelatinización, sino también la calidad del producto final. Los tornillos de extrusión son largos en relación a su diámetro ($L/D > 10$). El tornillo consta de tres secciones cada una con una función: (1) La sección de alimentación se caracteriza por poseer alabes hondos que aceptan fácilmente los ingredientes crudos y los transportan hacia delante. Durante el proceso de transporte los materiales alimentados son trabajados en una masa continua, el aire es expulsado y los espacios vacíos son eliminados, haciendo que los alabes se llenen completamente. (2) La sección de compresión o transición. En esta sección del tornillo los ingredientes húmedos son convertidos en una masa termoplástica por la gelatinización del almidón e hidratación de la proteína. Esta zona se caracteriza generalmente por la disminución de la altura de las hélices o restricciones internas consistentes de platos que restringen el área de sección

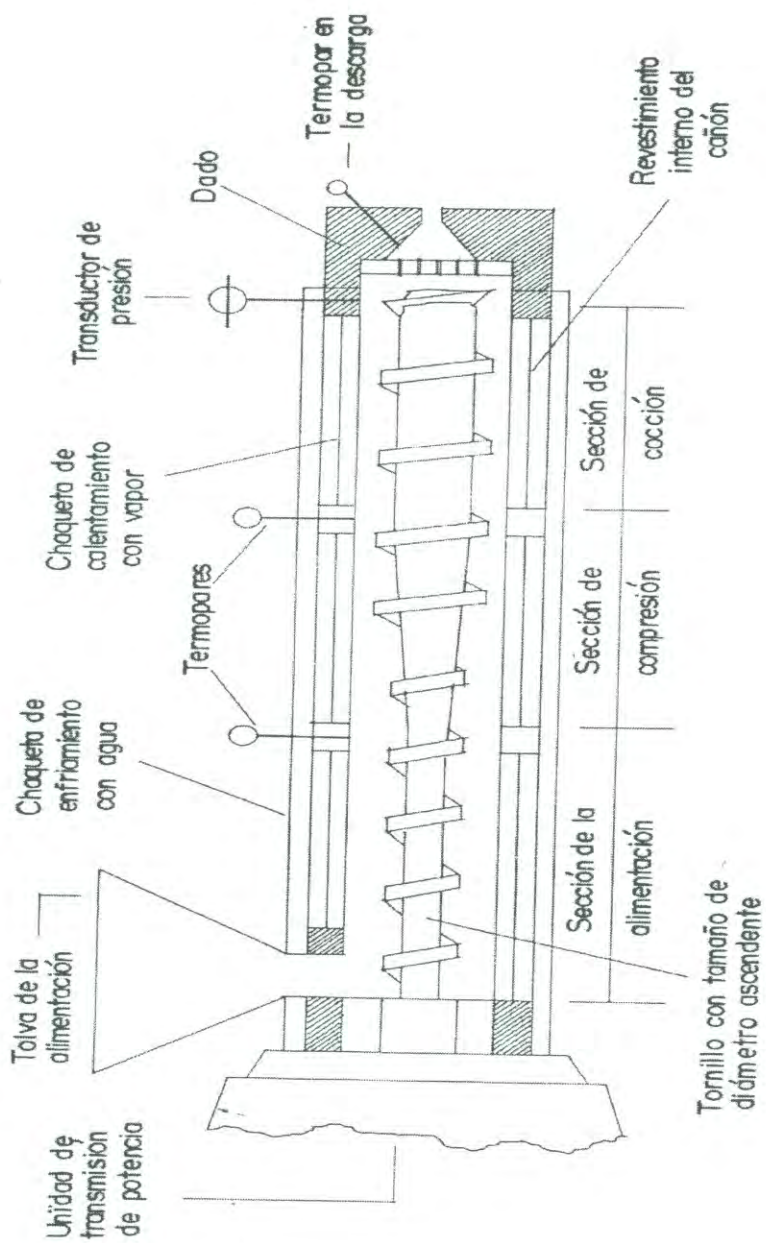


Fig. 4. Diagrama esquemático de un extrusor de tornillo simple
Fuente: Harper (1989).

transversal del tornillo al flujo. Estas restricciones incrementan la relación de esfuerzo de corte y la energía mecánica suministrada al alimento, resultando en un incremento en la temperatura. (3) La sección de medición o cocimiento. Es donde el flujo, la presión, compresión y velocidad de corte son altos. Esta zona se caracteriza porque tiene hélices poco profundas o hélices con una disminución del paso de tornillo. Aquí, la masa termoplástica se transforma en una masa plástica. Como resultado de la conversión de la energía mecánica en energía térmica, la acción del corte en esta zona se homogeneiza y adiciona más calor a la mezcla. Esta zona es, quizá, la más importante del extrusor. Su función es recibir el material comprimido, homogeneizarlo y hacerlo pasar a través del dado a presión constante.

Camisa o cañón. La camisa de un extrusor generalmente está constituida por secciones que se ensamblan fácilmente. La sección de la camisa correspondiente a la descarga del tornillo puede ser reemplazada cuando empieza a dañarse, sin necesidad de reemplazar completamente la camisa. La superficie interna de la camisa es endurecida para incrementar su vida. Normalmente, la camisa en los extrusores de cocción es acanalada en la superficie interna con el objetivo de reducir el deslizamiento e incrementar la capacidad de bombeo.

Dado. Este componente puede tener diversas configuraciones. Usualmente, el dado consiste de un círculo con múltiples orificios y el diámetro del mismo corresponde al centro de las hélices en la descarga del tornillo. El dado tiene una función doble: moldea el producto a una forma requerida y trabaja como un restrictor de flujo para incrementar la presión en la zona de cocción del extrusor. Debido al papel crítico de la geometría del dado en la determinación de la forma y la calidad del extrudido, se ha desarrollado un gran número de dados que van desde un dado simple en forma de cilindro hasta dados múltiples donde las salidas de dos extrusores se combinan por medio de un dado sencillo para obtener productos con características duales tales como dos colores o dos sabores.

Mecanismo de corte. Este mecanismo es utilizado algunas veces para cortar el producto extrudido al mismo tiempo que sale del extrusor. Deber ser capaz de cortar el producto en longitudes uniformes con superficies de corte limpias. La longitud del producto está determinada por la velocidad de la navaja de corte. Un motor de corte variable permite que la velocidad de corte pueda adecuarse a la velocidad de extrusión para lograr uniformidad en los productos. Algunos tipos de mecanismos de corte comunes son las cuchillas horizontales y verticales.

Extrusión y la Obtención de Harinas de Maíz Nixtamalizadas

La extrusión se ha utilizado como un proceso continuo de nixtamalización para producir harinas instantáneas. En este proceso se evita la gelatinización completa de los almidones y la expansión del extrudido. Algunos autores han reportado que el tamaño de partícula de los ingredientes, el contenido de humedad, la temperatura de extrusión, la velocidad y la configuración del tornillo, y el tamaño y forma de la boquilla afecta significativamente al producto (Vargas-López, 1987; Serna-Saldívar *et al.* 1988; Milán-Carrillo, 2003; Galicia, 2005).

Cambios que Ocurren Durante la Extrusión del Maíz

Se han realizado algunas investigaciones en la elaboración de harina nixtamalizada de maíz para tortilla y sus efectos, utilizando la extrusión como tecnología alterna.

Arámbula *et al.* (1998), estudiaron el efecto de la gelatinización del almidón sobre sus propiedades térmicas, dieléctricas y reológicas de la masa a varias temperaturas de procesamiento (50-100°C). Los resultados arrojaron un óptimo a la temperatura de 80°C. La caracterización textural en tortillas preparadas con estas masas a las diferentes temperaturas también fueron buenas.

Arámbula *et al.* (2002), estudiaron el efecto de la incorporación de pericarpio de maíz en la harina para la producción de masa y tortillas. Los parámetros estudiados fueron la capacidad de absorción de la harina, rollabilidad, grado de inflamamiento y fuerza de corte en tortillas (evaluadas a la 1 y 24 horas de su preparación). También se evaluaron viscoamilogramas, imágenes de difracción de rayos X y la cristanilidad de las harinas extrudidas y de las tortillas. La harina con 3 %(p/p) de pericarpio presentó un alto rendimiento en la producción de tortilla, se mejoró el grado de inflamamiento, la velocidad de deshidratación, rollabilidad y las características de fuerza de corte de la masa fresca y la tortilla.

Bazua *et al.* (1979), elaboraron masa y tortilla a diversas concentraciones de cal (0.1 a 1.0%). Se compararon con las elaboradas mediante el proceso tradicional para determinar sus propiedades organolépticas así como su contenido de lisina, triptófano y proteínas. Los resultados organolépticos mostraron que se pueden elaborar tortillas aceptables utilizando la extrusión como proceso alternativo.

Chen *et al.* (1991), emplearon un extrusor de tornillo doble para extrudir maíz amarillo. Para el establecimiento de las mejores condiciones de operación aplicaron la metodología de superficie de respuesta. El estudio incluyó variaciones en la velocidad del tornillo (100 -300 rpm), temperatura de proceso (100 -200° C) y contenido de humedad de la materia prima (20-30%). Se aplicó análisis sensorial descriptivo para caracterizar apariencia, aroma, sabor y textura de los extrudidos. La temperatura afectó significativamente el aroma a maíz tostado, sabor, densidad, masticabilidad, crujibilidad y dureza. La interacción temperatura/contenido de humedad de la materia prima tuvo influencia significativa sobre la textura superficial, aroma a harina cruda, sabor y aroma a maíz tostado, masticabilidad y dureza. La interacción temperatura/velocidad del tornillo tuvo un efecto importante sobre el índice de expansión y la densidad de los extrudidos.

Gómez y Aguilera (1983) reportaron un estudio sobre los cambios en la fracción de almidón de maíz durante extrusión por calor. Utilizaron un extrusor bajo las siguientes condiciones: velocidad de tornillo 75 rpm, diámetro de dado 8 mm y varios contenidos de humedad (23.7, 18.5, 15.4, 13.9 y 7.6%). Se observó que a medida que disminuía el contenido de humedad incrementaba el índice de solubilidad en agua, la susceptibilidad enzimática, el grado de gelatinización y el valor azul de la reacción amilosa con yodo; mientras que el índice de absorción de agua y los carbohidratos solubles disminuían.

Galicia (2005) elaboró harina de maíz nixtamalizada utilizando como materia prima maíz de calidad proteica (MCP V-537C), a diferentes condiciones de procesamiento, y utilizó como variables respuesta algunos indicadores de calidad de harinas como la absorción de agua, color, factor compresión tensión, índice de tamaño de partícula, densidad aparente, pH, índice de material soluble. También se evaluó la calidad de la tortilla como peso, diámetro, espesor, inflado, rollabilidad y firmeza. La tortilla elaborada con harina de maíz extrudida presentó un buen inflado, así como una adecuada rollabilidad y firmeza a las 2 h de almacenamiento, sin embargo, después de 24 h de almacenamiento se presentó un endurecimiento al disminuir la flexibilidad en la tortilla. Las mejores combinaciones de las variables del proceso para la HMNE fueron: 27.72% de humedad, 134.84°C de temperatura y 112.39 RPM de velocidad de extrusión, que presentan características similares a la harina de maíz comercial.

González (2006), evaluó los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón, en las etapas del proceso de elaboración de tortillas con harina nixtamalizada extrudida (THMNE), utilizando maíz de calidad proteica (V-537C), y los comparó con harina nixtamalizada comercial. Para evaluar los cambios fisicoquímicos del almidón durante el proceso, se tomaron muestras de maíz molido, harina extrudida y de tortilla. Además, se almacenaron lotes de tortillas a temperatura ambiente, y se realizaron muestreos a las 2, 24 y 48 h, para evaluar sus características texturales (rollabilidad y firmeza). A las muestras obtenidas de los productos del

proceso se les determinó contenido de amilosa aparente, almidón resistente, difracción de rayos x, viscosidad amilográfica, capacidad de absorción subjetiva de agua, índice de absorción de agua (ÍAA) e índice de material soluble (ÍMS), microscopía óptica y electrónica, y entalpías de gelatinización por calorimetría de barrido diferencial. Las modificaciones que sufrió el almidón en la harina extrudida parecen incrementar el proceso de retrogradación, tal como lo mostraron las propiedades texturales realizadas (firmeza y módulo de rigidez) durante el almacenamiento, ya que fueron mayores en la tortilla de harina extrudida (THMNE) que en la comercial. Ambas propiedades tuvieron un mayor efecto en la THMNE a las 24 h de almacenamiento, ya que se incrementaron drásticamente.

Lawton. *et al.* (1972), estudiaron el efecto de las variables de un extrusor sobre la gelatinización del almidón de maíz, el rango de la temperatura utilizada fue de 90-150 °C y el de la humedad de 27-39%, los resultados indicaron que la gelatinización máxima se dio a la mayor humedad y temperatura, reduciéndola al aumentar la velocidad de tornillo del extrusor.

Martínez-Flores *et al.* (1998), mencionan un proceso de nixtamalización de maíz dentado por extrusión, en donde se mezcla la harina de maíz integral (grano entero molido) con agua (60% en peso con respecto al maíz), y cal (0.25% en peso con respecto al maíz) y posteriormente se procesa la mezcla a través del extrusor a una temperatura de 80°C a velocidad del tornillo de 35 rpm y una relación de compresión de 1:1. Las masas frescas extrudidas se obtienen con un contenido de humedad de 51.09% \pm 0.78 y 51.38% \pm 1.20. En este estudio se observaron que ciertas características de la harina integral de maíz como son el tamaño de partícula, el almidón dañado por la molienda y la configuración del tornillo de extrusión pueden influenciar la calidad de la masa y las tortillas obtenidos por extrusión. La molienda daña los gránulos de almidón modificando su estructura y convirtiendo las zonas cristalinas en moléculas internas desordenadas. El almidón dañado y el calor excesivo generado por la extrusión resultan en una masa pegajosa, generando tortillas con características

indeseables. Por lo que la calidad de la masa y tortillas extrudidas son muy sensitivas a las condiciones de extrusión utilizadas.

Mercier y Fillet (1975), hacen mención del efecto de la temperatura de extrusión sobre el índice de absorción y solubilidad en agua (IAA, ISA), viscosidades y expansión en un extrusor de doble tornillo a temperatura de 70 a 225 °C y a una humedad constante del 22%. Los resultados obtenidos muestran que el IAA se incrementó al aumentar la temperatura, a un rango de temperatura de 135°C a 225°C, la expansión del extrudido se incrementó, el IAA permaneció constante, mientras que la viscosidad de la pasta a 50 °C disminuyó.

Milán-Carrillo (2002), reporta un proceso tecnológico donde se utilizó como variables respuesta indicadores de calidad de las harinas: digestibilidad proteínica in-vitro, índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), diferencia total de color, pH y proteína verdadera; en lo referente a la harina de maíz de alta calidad proteínica (MCP) extrudida se tuvo una temperatura de extrusión de 79.4°C, concentración de cal 0.24% en relación al peso del grano, velocidad del tornillo de 73.5 rpm y humedad del 28%, obteniendo que a estas condiciones se tenían harinas con características fisicoquímicas y funcionales similares a harinas comerciales de maíz nixtamalizado y estas pueden ser utilizadas ya sea solas o en mezclas para la elaboración de productos para consumo humano con un alto valor nutricional.

Milán-Carrillo *et al.* (2006), aplicaron la metodología de superficie de respuesta para encontrar las mejores condiciones de las variables proceso de extrusión para producir harina de maíz de calidad proteica para la elaboración de tortillas. La humedad de acondicionamiento de la harina fue de 28% a una concentración de cal de 0.1-0.3%, utilizando una temperatura de extrusión de 70-100°C y una velocidad de tornillo de 80-250 rpm. Y las variables respuesta fueron digestibilidad de proteína in vitro, diferencia de color total en harina y el inflado en tortilla. Las mejores combinaciones encontradas fueron temperatura = 85°C / cal

=0.21% / velocidad tornillo=240 rpm. Las tortillas de maíz de calidad proteica presentaron una composición química, fisicoquímica y propiedades sensoriales similares a la elaborada con harina de maíz nixtamalizada comercial; sin embargo, presentó un alto contenido de lisina.

En conclusión en todos los estudios reportados, el proceso de extrusión para producir harina de maíz nixtamalizada sin aditivos y usadas para la elaboración de tortilla es bueno para producto fresco. Sin embargo, en el almacenamiento la tortilla se endurece y disminuye su flexibilidad. Por lo que es importante considerar el uso de aditivos tales como los hidrocoloides.

Hidrocoloides

Los hidrocoloides, más comúnmente conocidos como gomas, se definen como un grupo de ingrediente de alimentos que varía ampliamente en forma y función que controlan significativamente las propiedades texturales de los alimentos. La forma en que imparte su papel texturizante específico a cualquier producto alimenticio particular puede variar de acuerdo con el ingrediente en cuestión y dependerá, por ejemplo, del tipo, fuente y concentración así como de las propiedades físicas del sistema en particular (Gurkin, 2002; Rosenthal, 2001). Los hidrocoloides son polímeros de cadena larga de alto peso molecular principalmente polisacáridos (largas cadenas de azúcares simples) o de sus derivados, que dependiendo de su tipo se disuelven o dispersan en agua fría o caliente para dar espesura y algunas veces un efecto de gelificación (Glicksman, 1982; Pszczola, 2003; Ward y Andon, 1993). Las gomas consisten principalmente de fibra dietaria soluble (60-85 g/100g de FDT) y son metabolizadas en el intestino largo por lo que no contribuyen como una fuente de nutrientes, ya que contienen trazas de proteínas, lípidos y algunas sales minerales (Ward y Andon, 1993).

Los hidrocoloides son ampliamente utilizados en la industria en una variedad de alimentos (Ward y Andon, 1993), presentando diferentes funciones como se muestra en la Tabla 1. Estos ingredientes pueden ser utilizados solo o en combinación con otro (Ahmed, 2004), jugando un papel sofisticado en el campo de desarrollo en alimentos en términos de que proveen espesura, textura, estabilidad en la congelación y descongelación, enriquecimiento de fibra, manejo o control de humedad, emulsificación, gelificación, y control de cristal de hielos entre otros. Estos efectos son lo que ayudan para la extensa aplicación de las gomas, haciendo posible la creación de nuevos productos o mejorando sobre los ya tradicionales (Pszczola, 2003), siendo su mercado explotado en las industrias de botanas, lácteos, bebidas, confitería, congelados y de alimentos dietarios (Ahmed, 2004).

Fuente

Las gomas son obtenidas de un variedad de fuentes, la mayor parte proviene de materiales de plantas tales como algas marinas, semillas, y de exudado de árboles; otros son productos de biosíntesis microbiana; y hasta otras son producidas por modificaciones químicas de polisacáridos naturales (Anónimo, 1991; Pszczola, 2003).

Derivados de algas. Dentro de las gomas derivadas de algas marinas se tiene a la agar, carragenina y los alginatos (Fig. 5).

Agar. Es obtenida a partir de especies de algas rojas (*Gelidium*, *Gracilaria* y *Eucheuma*, de la clase *Rhodophyceae*). Es una mezcla de polisacáridos azarosa y agarpectina. Si bien es conocida por la mayor parte de la gente como un medio

Tabla 1. Funciones de gomas en alimentos.

Función	Aplicación
Adhesividad	Panes glaciados
Agente clarificante	Cerveza, vinos
Agente de cobertura	Confitería
Agente engrosante	Carnes procesadas
Agente espesante	Salsas, rellenos de pies
Agente floculante	Vinos
Agente gelificante	Pudines, postres
Agente ligador	Embutidos
Agente suspensante	Leche de chocolate
Agente turbeante	Jugos de frutas
Agente voluminoso	Alimentos dietéticos
Emulsificante	Aderezo para ensaladas
Encapsulador	Fijadores de sabor en polvo
Estabilizador	Cerveza, mayonesa
Estabilizador de espuma	Cerveza
Formador de película	Embutidos
Inhibidor de cristales	Nieves, jarabes de azúcar
Inhibidor de sinéresis	Quesos, alimentos congelados
Protector de coloide	Emulsiones

Glicksman, 1982

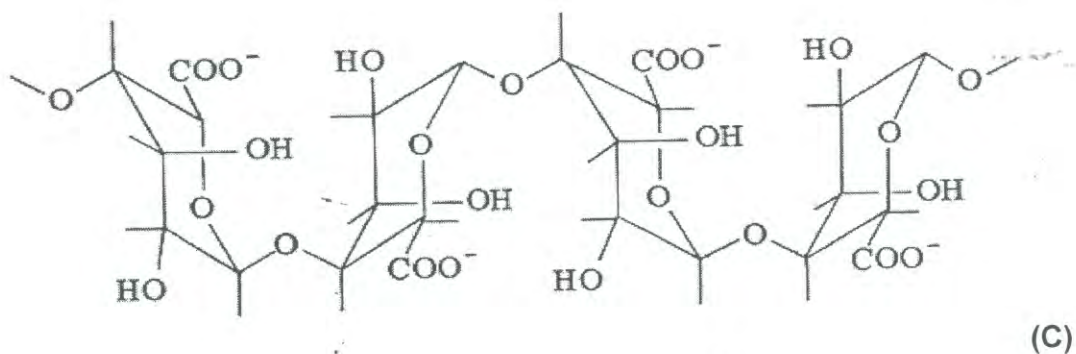
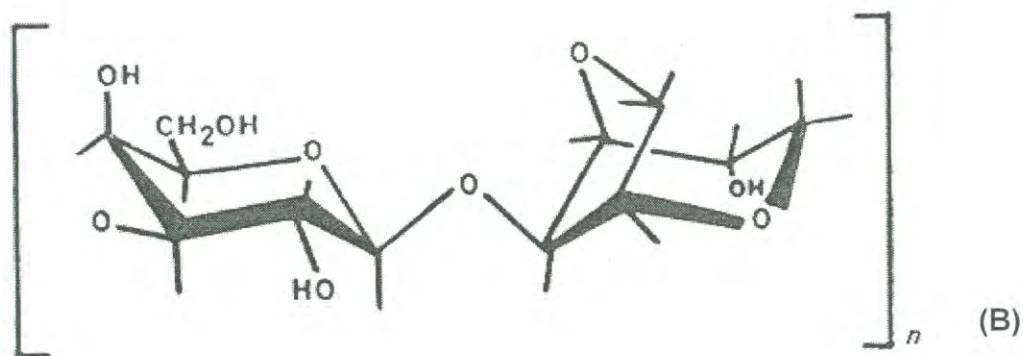
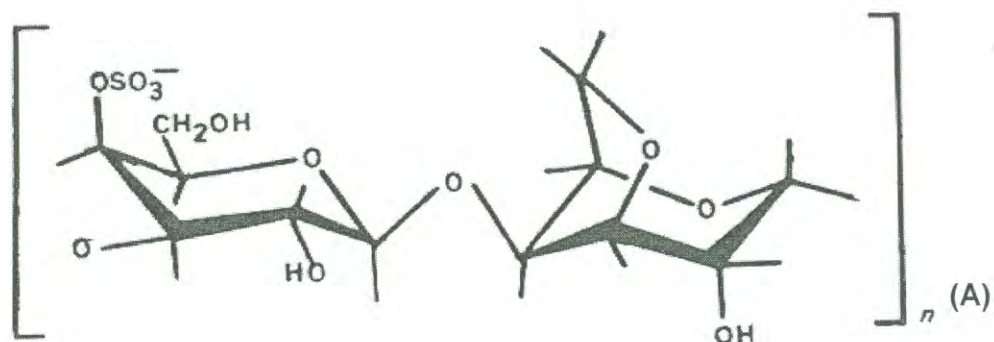


Figura 5. Estructuras de gomas derivadas de algas: A) agar; B) carragenina-k y C) alginatos.

Fuente: Pomeranz (1991).

para el crecimiento de microorganismos, los materiales derivados de algas han sido utilizados por siglos por Asiáticos para la elaboración de jaleas y de otros alimentos (Pszczola, 2003).

El agar tradicional es insoluble en agua fría, poco soluble en agua caliente y soluble en agua hirviendo, formando un gel al enfriarse. Los geles son formados aproximadamente a los 35°C y no se derriten debajo de los 85°C. Agar es frecuentemente considerado como el superior a otros agentes gelificantes por lo que es llamado la reina de los agentes gelificantes porque sus geles presentan una gran transparencia, resistencia, estabilidad sobre un rango de acidez y alcalinidad, y reversibilidad sin descomposición, por lo que tiende a ser más caro que otros agentes gelificantes. La aplicación de la goma agar como estabilizador en productos congelados, glaseados y en rellenos de pie; en productos de pescado, carne y aves; Yogurt, pudines, dulces, bebidas nutricionales y en otros donde alternativas de gelificación son requeridas. Los alimentos preparados con agar tienden a ser menos pegajosos que aquellos formulados con otros agentes espesantes (Pszczola, 2003).

Carragenina. Las carrageninas son extractos de algas rojas. Estos polisacáridos de alto peso molecular son hechos a partir de unidades de repetición de galactosa y anhidrogalaactosa, sulfatados y monosulfatados unidos por uniones glicosídicas alternantes. Una variedad de arreglos ocurren naturalmente – kappa, iota y lambda con uno, dos y tres sulfatos por dos unidades de azúcar, respectivamente (Gurkin, 2002). Una de las características más sobresaliente de la carragenina es su habilidad para formar geles en un amplio rango de resistencia y textura, posible por sus tres tipos básicos: kappa, iota y lambda, cada una con diferentes propiedades en solubilidad y gelificación. Los tipos kappa, iota requieren agua caliente para su solubilidad completa y pueden formar geles reversibles térmicamente en la presencia de cationes como el potasio y calcio. Los geles kappa son quebradizos y exhiben sinéresis, mientras que los geles iota son más

elásticos y no presentan sinéresis. Los tipo lambda son solubles en agua fría y no forman geles. Carragenina kappa e iota son muy reactivos con productos de proteína de leche, La carragenina es utilizada en concentraciones bajas en la estabilización de productos lácteos y mejor la producción y textura en productos cárnicos y avícolas. También es utilizada en dulces de gomas, que ha resultado en retener la textura integral, extendiendo así la vida de almacenamiento (Pszczola, 2003). Las carrageninas han sido estudiadas por su efectividad en masas congeladas y conservan la rollabilidad en productos de tortilla (Gurkin, 2002).

Alginatos. El término “algin” es utilizado para describir el ácido algínico y sus formas de sales inorgánicas que son derivadas de algas cafés. Las sales monovalentes que a menudo son referidas como alginatos son coloides hidrofílicos y estos, especialmente alginato de sodio es ampliamente utilizado en la industria de alimentos. Alginato es un copolímero lineal compuesto de dos unidades monoméricas, ácido D-manurónico y el ácido L- gulopiranosilurónico, cuya relación y estructura influyen en las propiedades de las soluciones de alginatos, especialmente en la gelificación y resistencia del gel. Alginatos trabajan bien como estabilizadores en una variedad de aplicación de alimentos incluyendo frutas y vegetales, helados aderezos para ensaladas, salsa, pudines y bebidas nutricionales (Pszczola, 2003).

Derivados de semillas de planta. Dentro de las gomas a partir de semillas de planta están la guar, locust bean y la goma tara.

Guar. Un galactomanano obtenido de la semilla de la planta guar (*Yamopsis tetragonoloba*). Esta goma se dispersa en agua fría para formar soles viscosos, que en calentamiento desarrollaran una viscosidad adicional. Es un versátil espesante y estabilizador, utilizado para mejorar la consistencia de helados, salsas y postres, así como en la estabilización de bebidas de frutas y jugos y en

retener la humedad en pan y tortillas, así como en alimentos congelados (Gurkin, 2002; Pszczola, 2003).

Goma carob. Esta goma es un galactomanano derivado de semillas de árboles carob europeos o de árboles de locus bean (*Ceratonia siligua*). Su conveniencia en aplicaciones son por su buena estabilidad, espesamiento y por su propiedad emulsificante. Esta goma es parcialmente soluble en agua fría, pero requiere calor para conseguir una hidratación completa y máxima viscosidad, esto porque contiene una porción que es insoluble en agua fría. También provee altas viscosidades, formando geles con goma xantana en el calentamiento y enfriamiento de la solución. Los geles formados por agar o carragenina pueden ser más elásticos por la inclusión de la locus bean. Se utiliza en sopas, salsas y en quesos, siendo su mejor aplicación en helados, donde sirven para disminuir la velocidad de derretimiento, ya que forman pequeños cristales de hielo, resistentes a cambios estructurales que pueden presentarse durante el almacenamiento y distribución, dando un sabor y textura distintivo (Pszczola, 2003).

Goma tara. Es un lactomanano, que se obtiene de la semilla de la fruta del arbusto tara (*Caesalpinia spinosa*). Como la goma guar es soluble en agua fría y alcanza su máxima viscosidad en agua, leche y en otros sistemas de bajos sólidos en minutos. Y como la locus bean actúa sinérgicamente con la carragenina kappa y xantana para incrementar la resistencia del gel y hacer tales geles menos propensos a la sinéresis, por lo que por estas propiedades puede ser aplicada como estabilizador, espesante, emulsificante y gelificante en un gran número de alimentos, especialmente los de bajo o libre de grasa, tales como postres congelados de productos lácteos, bebidas, salsas y aderezos para ensaladas (Pszczola, 2003).

Exudado de plantas. Dentro de esta clasificación se encuentra la goma acacia o conocida como goma arábiga.

Goma Arábiga. Un exudado del árbol acacia, goma acacia, fue utilizado por los faraones hace más de 3000 años. Durante las cruzadas, mercantiles árabes organizaron el comercio de la goma acacia, la cual tomó el nombre “goma arábiga” entre las tribus africanas. De aquí los nombre acacia y arábiga son usados indistintamente (Pszczola, 2003). Recientemente se le encontró uso como adhesivo en las estampillas postales (Anónimo, 1991). Esta goma es una mezcla de sales de calcio, magnesio y potasio de un ácido polisacárido (ácido arábigo), compuesto de 6 carbohidratos (galactosa, arabinopiranososa, arabinofuranosa, ramnosa, ácido glucorónico y el ácido 4-O metilglucorónico (Glicksman, 1982).

La goma acacia se disuelve en agua caliente o fría, formando soluciones claras, y su solubilidad incrementa con la temperatura. Esta puede funcionar como un emulsificador, encapsulador, estabilizador y un retardante a la cristalización del azúcar. En barras nutritivas, puede ser usada como estabilizado de textura por el control de la actividad de agua; adhiriéndose todos los componentes (frutas, cereales, y otros) y funciona como un emulsificador eliminando la necesidad de agregar lecitina en el jarabe. También se aplica en la elaboración de botanas extrudidas ayudando a formar figuras más homogéneas e incrementando su crujibilidad y reduciendo su pérdida durante su almacenamiento. En jugos de frutas mejora la estabilidad ácida, reduciendo la astringencia. Esta goma puede ser utilizada como una alternativa de almidones modificados en la encapsulación de sabores (Pszczola, 2003).

Extractos de plantas. Dentro de los extractos de plantas se encuentra la pectina (Fig. 6).

Pectina. Obtenida a partir de cítricos y de manzana, la pectina es un carbohidrato que consiste principalmente de ácido galacturónico formando cadenas de polisacáridos lineales. Se clasifican de acuerdo a su grado de esterificación; clasificación principal que incluye ester-metil o pectinas AM, y bajos ester-metil o pectinas BM. Las pectinas AM requieren una cantidad mínima de sólidos solubles

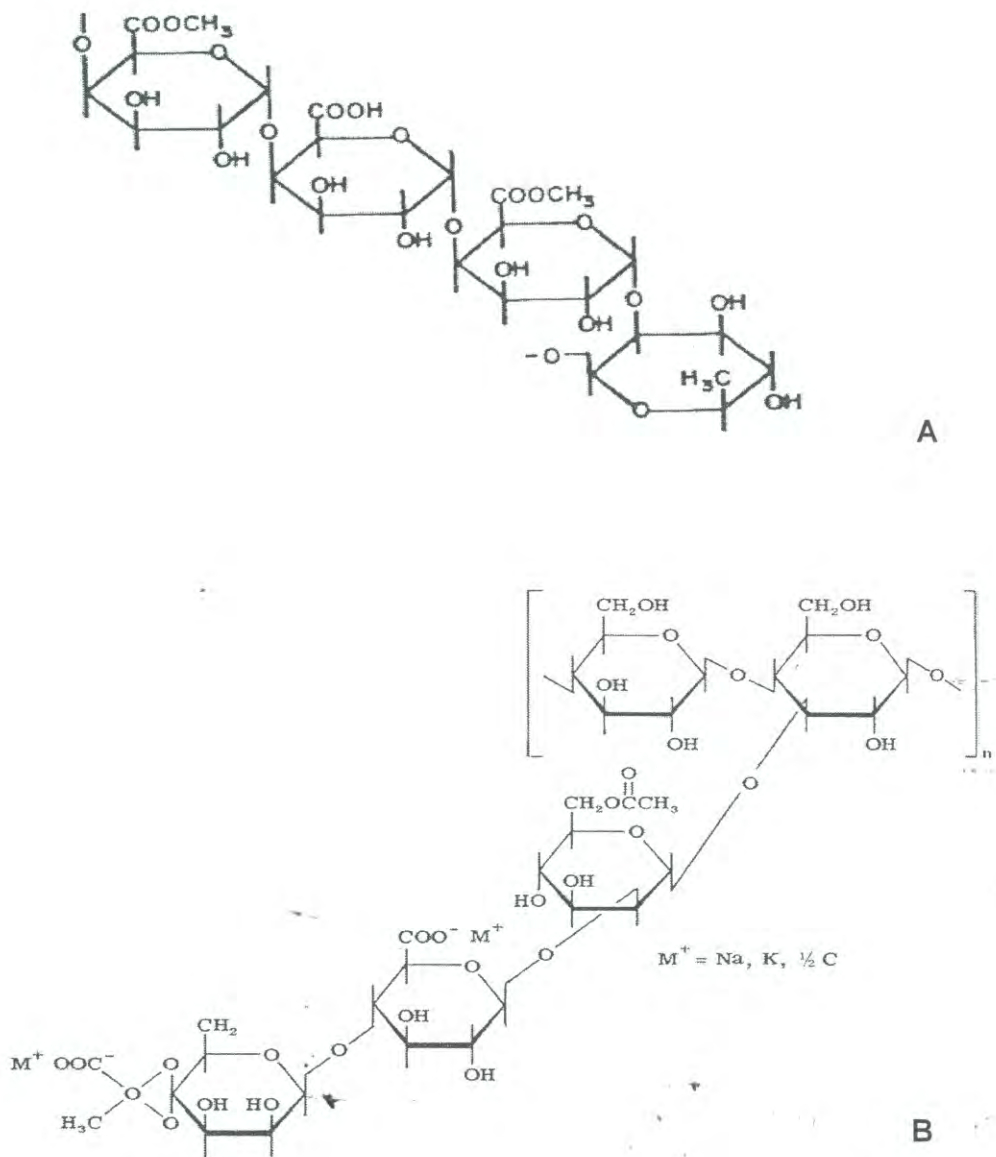


Figura 6. Estructura de las gomas pectina (A) y xantana (B).

Fuente: Pomeranz (1991).

y un pH bajo para la gelificación. Tienen un grado de esterificación más del 50% y forman geles irreversibles térmicamente en la presencia de azúcares a un pH menos que 3.5. Las pectinas BM, que presentan un grado de esterificación menos que el 50% no dependen del pH; no requieren ciertos niveles de ácido o azúcar, pero sí de la presencia de iones calcio para la gelificación. Las funciones de la pectina como agente gelificante imparte una textura como tal a productos particularmente mermeladas y jaleas. Sin embargo por su habilidad de unir agua pueden ser utilizadas como espesante y estabilizante como es en el caso de bebidas, yogurt y otros productos lácteos, así como en mayonesa (Pszczola, 2003)

Biosíntesis microbiana. Dentro de esta clasificación se tiene a la goma xantana (Fig.6).

Goma xantana. Es un polisacárido de alto peso molecular producido por la fermentación de *Xanthomonas campestris* sobre un medio de glucosa. La cadena principal de la goma xantana es construida por unidades de α -D glucosa con uniones 1-4. La cadena contiene dos unidades de manosa y una de ácido glucurónico que son encontrados como mezclas de sales de potasio, sodio y de calcio (Glicksman, 1982). La goma xantana se hidrata completamente en agua fría debido a sus largas cadenas, y exhibe resistencia a un amplio rango de condiciones de pH y temperaturas altas y es estable en la congelación y descongelación (Gurkin, 2002). Las gomas xantana ofrecen estabilidad en un amplio rango de ingredientes de alimentos y sus propiedades reológicas pseudoplásticas la hacen excelente en suspensiones y estabilización de sistemas coloidales. Se aplican en aderezos para ensaladas y salsas, productos lácteos, bebidas, preparación de frutas, alimentos congelados, alimentos dietéticos (Pszczola, 2003), así como en la elaboración de tortillas (Gurkin, 2002).

Gomas Celulósicas. Celulosa, un polímero lineal de glucosa unido por uniones β -1,4, puede ser químicamente modificado para producir gomas celulósicas tales

como la carboximetilcelulosa (CMC), hidroxipropilencelulosa (HPC) y la celulosa microcristalina (Pszczola, 2003).

Carboximetilcelulosa. La CMC es manufacturada con hidróxido de sodio acuoso seguido por una reacción de esterificación (Gurkin, 2002). Las gomas celulósicas juegan un papel importante en el desarrollo de alimentos con texturas especiales. Por ejemplo la CMC por sus características ayuda al control de la migración del agua y en la prolongación de la vida de anaquel, aplicándose en productos de panificación y en sistemas de dos fases (Pszczola, 2003). Así como en la elaboración de tortillas, donde junto con la goma arábica ha dado mejores resultados en sus propiedades de retención de agua (Gurkin, 2002). La CMC también ha sido utilizada en alimentos de baja calorías, en rellenos de pays, minimizando la sinéresis y en mezcla de proteínas para prevenir su precipitación en proteínas de soya o de caseinatos en sus puntos isoeléctricos (Anónimo, 1991).

Hidrocoloides Utilizados en Tortillas

Los hidrocoloides son un grupo de ingredientes de los alimentos que ampliamente varían en forma y funciones. Cuando son usados relativamente a bajas concentraciones (0.1-0.3%) son ingredientes multifuncionales que agregan flexibilidad en la producción de tortilla, actuando como reemplazador de grasa, ligador de agua, texturizante y adhesivo. Dentro de los principales hidrocoloides utilizados en tortilla se encuentran la carboximetilcelulosa (CMC), goma guar, alginatos, carrageninas y goma xantana (Gurkin, 2002).

Una calidad buena de tortillas de maíz es que sean blandas y puedan enrollarse en forma de taco sin daño alguno. Las características texturales de tortillas son relacionadas a la forma de ligamiento y de la cantidad de agua contenida. Una masa de maíz deshidratada produce tortillas duras y quebradizas.

Por lo tanto, la retención de agua en masa y tortilla es importante ya que la pérdida de agua en exceso hace un producto inaceptable (Arámbula *et al.*, 1999).

Comercialmente, las harinas de maíz instantáneas son formuladas con gomas y conservadores para retener agua y mejorar las propiedades fisicoquímicas y características texturales (Arámbula *et al.*, 1999), encontrándose gomas guar y xantana en un 0.38% y 0.18%, respectivamente (Flores *et al.*, 2002), así como CMC (Bedolla, 1984).

Las gomas incrementan la viscosidad de la masa y durante el proceso térmico compite con el agua retardando el grado de gelatinización del almidón (Bell, 1990; Christianson, 1982). También durante el enfriamiento, las gomas inhiben la retrogradación de la gelatinización de los gránulos de almidón incrementando la flexibilidad de las tortillas (Yau *et al.*, 1994). El grado de gelatinización durante el procesamiento térmico cambia la capacidad de la harina de maíz instantánea para absorber y retener agua. Esta capacidad es importante durante la rehidratación de estas harinas para formar masa y poder ser asociada con cambios estructurales y propiedades texturales en la tortilla (Arámbula *et al.*, 1999).

A la fecha son escasos los trabajos en relación a la aplicación de hidrocoloides en masas de maíz extrudidas para la elaboración de tortillas.

Arámbula *et al.* (1999), elaboraron harinas de maíz blanco comercial obtenidas por extrusión de harina de maíz con el uso de hidrocoloides, por ejemplo: CMC, goma arábica, goma guar y xantana al 0.5% se estudiaron a diferentes concentraciones de cal (0.1, 0.2 y 0.3). Las gomas fueron agregadas antes o después del proceso de extrusión. El proceso de deshidratación seguido de la pérdida del peso en masa (el índice de absorción de agua y la pérdida de peso durante la cocción) y las características fisicoquímicas de la masa fueron optimizadas dando tiempos más largos de procesamiento, las tortillas

deshidratadas obtuvieron buenos resultados en sus características texturales (rollabilidad, extensibilidad y fuerza de corte). El coeficiente de difusión más bajo de la humedad fue encontrado en las muestras de la masa que contenían 0.2% p/p de cal y con la goma xantana agregada antes de la extrusión. Estas masas producen tortillas con características de textura aceptable. Cabe mencionar que en esta investigación se utilizó un extrusor a condiciones fijas.

Gimeno (2004), aplicó gomas como la CMC y xantana al 1% en la elaboración de pellets de maíz por extrusión, mejorando la figura y propiedades texturales de las muestras expandidas en microondas, contribuyendo a estos efectos la participación de dichas gomas en la reología y capacidad de absorción de humedad en la matriz. Propone la hipótesis de que las moléculas de hidrocoloides interpenetraron la matriz del almidón polimérico y formaron una red fina de "agujeros" distribuidos uniformemente en la matriz, que sirvieron como sitios de nucleación adicional para la expansión. Y así, moléculas de agua penetraron en estos agujeros logrando una distribución uniforme a través de la matriz, formándose sitios disponibles para una expansión sin ruptura, con celdas uniformes y paredes delgadas, al liberarse el agua en forma de vapor con el calor de microondas aplicado.

De acuerdo al estudio de Arámbula *et al.* (1999), la goma xantana resultó la mejor por incrementar la viscosidad de la masa y mejorar la calidad de las tortillas a partir de harina de maíz extrudida por su capacidad de extender la retrogradación del almidón y de disminuir la difusión de agua. Sin embargo, no se ha estudiado su efecto durante su almacenamiento.

Una característica de la goma xantana es su insensibilidad a la temperatura, permitiendo así viscosidades altas a temperaturas elevadas (Miller y Hosney, 1993), por lo que una mezcla de almidón extrudido y goma xantana dan una viscosidad alta y este efecto es descrito como una interacción física entre la goma xantana y el almidón, resultando una esterificación del almidón con una

resistencia de sinéresis (Hanna *et al*, 1997), mejorando la retención de humedad y textura en masa y tortillas.

Pruebas Reológicas Dinámicas

En la actualidad, uno de los métodos más frecuentemente utilizados para el estudio de las propiedades viscoelásticas de las masas es el método Dinámico, adaptado de técnicas utilizadas en el estudio de los polímeros. En las pruebas dinámicas se obtienen como resultados parámetros bien definidos que ayudan a lograr una caracterización adecuada de materiales cuyo comportamiento reológico es complejo (Faubion y Hosney, 1990).

Estas pruebas son capaces de aplicar esfuerzos de bajas magnitudes a las muestras, así como de operar a bajas deformaciones relativas y velocidades de deformación relativa. Los datos obtenidos mediante esta prueba se emplean en el cálculo de los módulos dinámicos de almacenamiento y de pérdida, la energía almacenada elásticamente y la disipada como calor durante cada ciclo de deformación, relativamente. La validez de estos cálculos requiere que las muestras tengan un comportamiento viscoelástico lineal (Faubion y Hosney, 1990). A continuación se muestra una breve revisión de las ecuaciones y cantidades involucradas en las pruebas dinámicas oscilatorias utilizando una geometría de platos paralelos. Uno de los platos entre los que se encuentra la muestra se hace oscilar sinusoidalmente con una frecuencia ω , en radianes por segundo, y una amplitud d , en mm, mientras el otro plato permanece estacionario (Fig. 7). Sin deslizamiento en ninguno de los platos, se crea un gradiente de deformación a lo largo del espesor h de la muestra. Puede demostrarse, mediante consideraciones teóricas, que la deformación relativa al espesor de la muestra es la relación entre la amplitud de la deformación y el espesor de la muestra. La velocidad de deformación relativa es la deformación relativa multiplicada por la

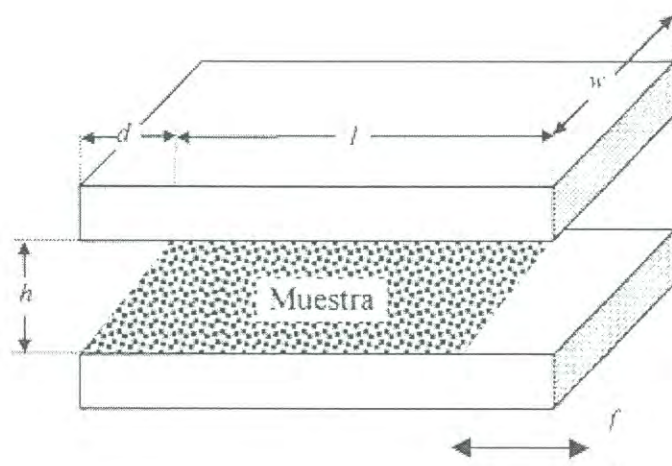


Figura 7. Geometría de platos paralelos para pruebas dinámicas.

Fuente: Faubion *et al.*, 1985

frecuencia. La deformación relativa es esencialmente uniforme en todo el espesor de la muestra cuando ésta se comporta linealmente. El plato estacionario se adjunta a un transductor de fuerza utilizado para medir la fuerza de respuesta f , en Newtons, que ejerce la muestra. El esfuerzo, es decir, la fuerza que se distribuye sobre el área de la muestra ($l \times w$) también es uniforme en toda la muestra. Si la muestra tiene un comportamiento viscoelástico lineal, el esfuerzo de respuesta tendrá una variación sinusoidal a la misma frecuencia que la deformación aplicada (Fig. 8), para el que puede presentarse un retardo, ángulo de fase, δ , en radianes (Faubion *et al.* 1985).

El esfuerzo y la deformación relativa, variando de manera sinusoidal, se representan matemáticamente como sigue:

$$\sigma = f / l w [\text{sen}(\omega t - \delta)] = \sigma_o (\omega t - \delta) \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = d / h [\text{sen}(\omega t)] = \gamma_o \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

Donde:

σ_o = Amplitud del esfuerzo (Nw / mm²)

γ_o = Amplitud de la deformación relativa (mm / mm)

f = Fuerza de respuesta (Nw)

l = Longitud de la muestra (mm)

W = Ancho de la muestra (mm)

ω = Frecuencia (rad/s)

δ = Ángulo de fase (rad)

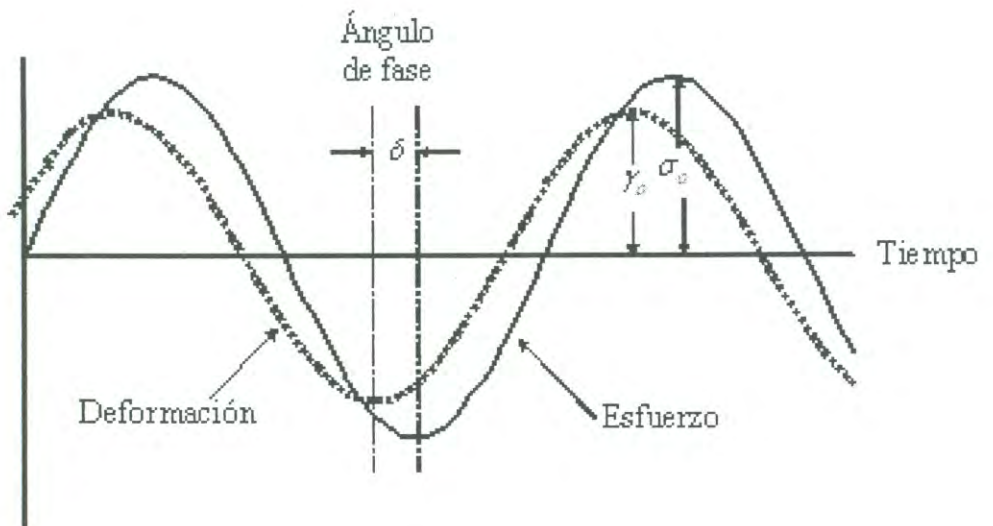


Figura 8. Deformación oscilatoria y esfuerzo de respuesta en pruebas dinámicas.

Fuente: Goodwin y Hughes (2000).

Por conveniencia, el esfuerzo y la deformación relativa pueden expresarse en variación de variable compleja (Faubion *et al.* 1985). La relación entre el esfuerzo complejo y la deformación relativa compleja es el módulo complejo G^* , que puede expresarse como

$$G^* = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} (\cos\delta - i \operatorname{sen}\delta) \quad (3)$$

El módulo de almacenamiento G' y el módulo de pérdida G'' son los coeficientes de las componentes real e imaginaria del módulo complejo, respectivamente; por lo tanto:

$$G' = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} \cos\delta \quad (4)$$

$$G'' = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} \operatorname{sen}\delta \quad (5)$$

El valor absoluto del módulo complejo está dado por

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (6)$$

En la práctica pueden medirse f , d y δ a diferentes frecuencias y deformaciones relativas. Los módulos de almacenamiento y de pérdida se reportan de ordinario como función de la frecuencia. Estos valores también pueden utilizarse para determinar otras propiedades viscoelásticas de materiales complejos tales como las masas de harina de trigo. El ángulo de fase representa una medida simple de las naturalezas elásticas y viscosa de material. Algunas ocasiones esta propiedad se expresa como la tangente de pérdida ($\tan \delta$), es decir la relaciones entre los módulos de pérdida y almacenamiento (G'' / G'). Este resultado puede obtenerse dividiendo la ecuación (5) por la ecuación (4). Cuando el ángulo de fase se aproxima a cero, el material se comporta mas como un sólido elástico. Por otro lado, si δ se aproxima a 1.57 radianes (90°) el material se comporta de manera similar a un fluido newtoniano. Valores intermedios entre 0 y 90° son para materiales viscoelásticos (Faubion *et al.* 1985; Goodwin y Hughes, 2000).

Varios autores (Agyare *et al.*, 2004; González, 2005; Lee *et al.*, 2003; Magaña, 2005; Masi *et al.*, 1998; Rodríguez, 2003; Safari-Ardi y Phan-Thien, 1998), han aplicado el método dinámico en masas de trigo con diferentes variedades. Sin embargo, en masas de maíz no se cuenta con estudios realizados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Maíz

Se utilizó maíz blanco (variedad comercial). El maíz fue limpiado en una zaranda vibratoria Clipper (Marca BLOUNT/ Ferrell-ross, modelo M2BC; Bluffon, In, E.U.A). Se almacenó en un cuarto de refrigeración a temperatura de 5°C, hasta su uso. Con el fin de comparar las harinas extrudidas, se empleó una harina nixtamalizada comercial (marca MASECA), así como masa de nixtamal de una tortillería local de Hermosillo, Sonora.

Caracterización química

Se realizó un análisis proximal del maíz y de la harina comercial siguiendo los métodos oficiales de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 2001). Las determinaciones fueron: Humedad (Método 44-15); Cenizas (Método 08-01); Proteína (Método 46-13); Lípidos (Método 30-26) y Carbohidratos por diferencia.

Molienda de Maíz

Muestras de maíz de 2 kg fueron molidas de manera integral (conservando su germen y pericarpio), en un molino pulverizador (Marca Pulvex, Modelo 200 y serie 1030401), con una malla de 0.5 mm . El maíz molido se puso en bolsas de plástico para evitar pérdidas de humedad y almacenado en un cuarto de refrigeración a temperatura de 5°C, hasta su uso.

Proceso de Extrusión

Acondicionamiento

El maíz molido se mezcló primero con cal (grado comercial) al 0.3 % (p/p) y con goma xantana (marca Spectrum) a las concentraciones de 0.16, 0.30, 0.50, 0.70, 0.85 % (p/p), en una mezcladora industrial (marca Horbat modelo AS200T, E.U.A) por un tiempo de 3 minutos. Posteriormente se agregó a esta mezcla agua destilada hasta alcanzar una humedad establecida de 21.6, 25, 30, 35, y 38.4%. Estas humedades utilizadas fueron establecidas de acuerdo al diseño experimental. Las muestras fueron reposadas por 12 horas en bolsas de polietileno antes del proceso de extrusión a una temperatura de 25°C, con el propósito de una hidratación continua de las partículas de harina de maíz.

Extrusión

Descripción del equipo. El proceso de extrusión se realizó en un extrusor de un solo tornillo (Marca Brabender Instruments; Modelo E 19/25 D, Inc NJ E.U.A.). El extrusor consta de los siguientes datos técnicos: diseño unidad en plataforma, con dimensiones (Longitud*Espesor*Altura) aproximadas de 860*680*800 mm respectivamente, un peso aproximado de 106 kg, cañón de acero inoxidable con un diámetro de 19 mm y longitud de 25 D, motor de 1.5 kW con un torque máximo de 150 Nm, rango de velocidad de 1-150 min⁻¹, 1 zona de calentamiento 1300 W, 2 zonas con calentamiento/enfriamiento (1300 W c/u) y 1 zona de enfriamiento con agua; rango de temperatura de trabajo 40-450 °C; máxima presión 700 bars, 3 tornillos 19/25 con una tasa de compresión nominal de 1:1, 2:1 y 3:1; dados con diámetros de salida de 1 a 6 mm; con una capacidad de procesamiento de hasta 5 kg/h y puerto de control local mediante la consola de mando o remoto a través de un ordenador. Durante el proceso de extrusión, los diferentes parámetros son medidos de manera continua en función del tiempo, además los resultados son

representados en una tabla o gráfico que puede ser almacenado e impreso para su posterior evaluación.

Procedimiento. Las condiciones de operación del extrusor fueron seleccionadas de combinaciones factoriales de las siguientes variables del proceso: temperatura del extrusor, concentración de goma xantana y humedad de la muestra.

Las tres primeras zonas del extrusor se mantuvieron a 60 °C y la cuarta varió de 103.2 a 136.8 °C. La velocidad del tornillo (VT) se mantuvo constante a 112 rpm, valor de acuerdo al punto óptimo obtenido en el estudio de Galicia (2005). Se utilizó el tornillo #1 y el dado de 3 mm. de diámetro. La humedad del maíz molido acondicionado fue del 21.6 al 38.4 %. Lotes de 2 kg de maíz molido acondicionado se depositaron en la tolva de alimentación del extrusor, recorriendo las 4 zonas de calentamiento para ser extrudidos, y recolectados en una charola de acero inoxidable. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se colocaron en un charola, para así trasladarlos al secador tipo túnel, nivel planta piloto (sin marca), a 50°C por 1 hora y enfriados por 15 minutos fuera del secador a temperatura ambiente (25°C). A los extrudidos obtenidos se les midió el porcentaje de expansión.

Expansión de los extrudidos

Esta medida es utilizada como un indicador de las condiciones del proceso. Para cuantificarlo se tomaron de cada muestra extrudida 10 trozos del expandido y se les midió el diámetro externo con ayuda de un vernier digital (UNOX Metromex, México). El porcentaje de expansión se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Expansión} = (\text{diámetro del extrudido} / \text{diámetro del dado}) \times 100 \quad (7)$$

Obtención de las Harinas Nixtamalizadas Extrudidas

Los extrudidos fueron pasados a un molino pulverizador (Marca Pulvex, Modelo 200 y serie 1030401), con una malla de 0.5 mm, para obtener así la harina nixtamalizada extrudida, y fueron almacenadas en bolsas de polietileno y a una temperatura de refrigeración (5°C) hasta su uso posterior.

Evaluación de las Harinas

Humedad

Se determinó la humedad de las harinas siguiendo el método 44-15 de la AACC (2001).

Distribución del tamaño de partícula

La distribución de tamaño de partícula (DTP) nos indica la funcionalidad que presenta la harina (Sahai *et al.*, 2001). Es un factor importante cuando se define el propósito específico del producto (Gómez *et al.*, 1987). Por ejemplo, para elaborar tortillas suaves y/o flexibles se requieren harinas con un tamaño de partícula fina, mientras que para elaborar tostadas se requieren harinas de tamaño de partícula gruesas (grits) (Montemayor y Rubio, 1983). Se tomó una muestra de harina de 50 g, se colocó en una pila de 5 mallas de la serie de tamices U.S. número 20 (841 µm), 40(420 µm), 60(250 µm), 80 (177 µm), 100 (149 µm) y fondo. Las mallas se colocaron en el equipo de rotación Rotachoc (Chopin, Francia). Después se agitaron durante 5 min, se separaron cada fracción de las mallas con ayuda de una brocha y se pesaron las fracciones retenidas en las diferentes mallas. La distribución obtenida se reportó como el porcentaje de retención en cada malla en base a la muestra inicial de harina, como se indica a continuación:

$$\%DTP = \frac{\text{g retenidos en cada malla}}{\text{muestra inicial de harina}} \times 100 \tag{8}$$

Índice de tamaño de partícula.

El índice del tamaño de partícula (ITP) es un indicador de la calidad en harinas, ya que altos valores nos dan partículas mas finas que se relacionan con masas mas cohesivas, así como un mejor inflado y rollabilidad en tortillas (Gómez *et al.*, 1992). El ITP se calculó de acuerdo por Bedolla *et al.* (1984), con la siguiente fórmula:

$$ITP = \sum [(FN_0M_i)(\%DTP_i) + \dots + (FN_0M_n)(\%DTP_n)] \tag{9}$$

Donde:

FN₀M= Factor de número de malla.

DTP= Distribución del tamaño de partícula (%).

Cada factor utilizado depende del número de la serie de tamices U.S. (0.2, malla No 20; 0.4 malla No 40; 0.6 malla No 60; 0.8 malla No 80; 1.0 malla No 100 y fondo) y el % de retención de cada malla fue obtenido como se menciona en el análisis de distribución del tamaño de partícula.

Índice de absorción de agua

El índice de absorción de agua (IAA) es un parámetro que da idea de la absorción de agua de una harina y es un indicador de rendimiento en masa fresca (Molina *et al.*, 1977). Para su determinación se utilizó el método modificado por Anderson *et al.* (1969). La modificación consistió que se utilizó agua destilada a una temperatura ambiente (25°C). En un tubo para centrífuga de 50 ml se agregó un gramo de muestra, luego se le adicionaron 15 ml de agua destilada a temperatura ambiente. La suspensión se agitó durante 30 minutos seguida de una centrifugación a 5000 rpm durante media hora. El sobrenadante se colocó en un platillo de aluminio previamente tarado y se evaporó en una estufa de convección a 105°C (Marca Blue M/L Linderg, Modelo G01305A, Ashville, N.C, USA). El peso del gel se registró como el del precipitado, y el IAA se calculó con la siguiente ecuación:

$$IAA = (PG - PMbs - PMS) / PMbs \quad (10)$$

Donde:

PG= Peso del gel (g),

PMbs=Peso de la muestra en base seca,

PMS=Peso del material solubilizado

El IAA se expresó como : g de gel / g de muestra seca.

Índice de material soluble

El índice de material soluble (IMS) es un parámetro que nos indica la cantidad y/o el grado de degradación que sufre el almidón, cuando más drástico es un proceso mayor será el IMS (Tang y Ding, 1994). El IMS se determinó

utilizando el método modificado por Anderson *et al.*, (1969). Se calculó en base al peso del material soluble presente en el sobrenadante (utilizado para determinar IAA) y a la cantidad de muestra inicial. La determinación se realizó por triplicado, el IMS se calculó de la siguiente manera:

$$\text{IMS} = \frac{(\text{peso del material soluble en el sobrenadante})}{\text{peso seco de la muestra inicial}} \times 100 \quad (11)$$

Capacidad de absorción de agua subjetiva

La capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS) es la cantidad de agua que absorbe la harina para obtener una masa de consistencia apropiada para la preparación de tortillas y es una prueba subjetiva. Para esta prueba se utilizó la metodología descrita por Flores-Farias *et al.*, (2002). Se pesaron 100 g de harina, adicionándose agua de forma gradual, realizando un amasado manual suave hasta obtener una masa de buena consistencia. La cantidad de agua adicionada se registró como la capacidad de absorción de agua de la harina en ml de agua / 100 g de harina.

Color

El color de las harinas es un índice de calidad utilizado en tortillas que es percibido por el consumidor (Bedolla y Ronney, 1984). Se determinó en un colorímetro (Minolta Chromameter, modelo CR-210, Minolta LTD, Japón). Para la evaluación del color la muestra se colocó en cajas petri de 3.5 de diámetro y 1 cm de altura y se midieron los parámetros L (luminosidad, mayor 100, menor 0), a (+ hacia rojo, - hacia verde) y b (+ hacia amarillo, - hacia azul).

Viscosidad amilográfica

El amilógrafo es un viscosímetro que mide los cambios en la viscosidad de una suspensión de almidón-agua la cual es agitada y calentada a una velocidad constante (Serna-Saldivar, 1996). Se obtuvieron amilogramas de las harinas de maíz crudo y extrudidas por el método oficial 126 (ICC,1985), utilizando un amilógrafo (marca Brabender Ogh Duisburg, modelo 800245). Los parámetros medidos fueron viscosidad máxima y su temperatura final correspondiente.

Evaluación de las Masas

Humedad

Se determinó la humedad de las masas utilizando el método 44-15 (AACC, 2001).

Propiedades viscoelásticas

Preparación de las muestras. Se prepararon muestras de masas extrudidas y de maseca utilizando 100 g de harina extrudida o de maseca y agua destilada. La cantidad de agua empleada, en mililitros, correspondió a la capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS). Una vez preparada, la masa se dejó reposar durante 30 minutos en una bolsa plástica a temperatura ambiente (25°C). Después se pesaron tres muestras de 2 g de masa cada una para ser utilizada en el reómetro. Para evitar pérdidas de humedad en las muestras de masa, éstas fueron colocadas en bolsas de plástico cerradas herméticamente y se dejaba a temperatura ambiente (25°C). Con respecto a la masa de nixtamal también se

pesaron tres muestras de 2 g cada una, aplicándose el mismo procedimiento anterior.

Barrido dinámico oscilatorio. La metodología para estas pruebas fue la siguiente: Se colocó la muestra en un reómetro o espectrómetro mecánico dinámico (marca Rheometrics Scientific, modelo RSF III, Piscataway, NJ) equipado con platos paralelos de 25 mm y una cámara para el control de temperatura (peltier). La muestra se colocó a una separación de 2.5 mm entre los platos. Posteriormente se cortaban los sobrantes de la masa por medio de un instrumento plástico, seguido a esto se aplicaba por medio de una jeringa plástica vaselina (crema de petrolato) en los confines de la muestra expuesta al ambiente para evitar que se perdiera humedad y se resecara, evitando así el menor grado de error en los resultados. Después de esto se llevaron a cabo las pruebas.

Las pruebas de barrido de frecuencia se configuraron mediante el software de control (RSI Orchestrator, Rheometrics Scientific), para realizarse a una deformación del 0.04% a 25°C. Previamente se determinó la deformación a la cual se trabajaría en la región lineal viscoelástica. El barrido de frecuencia se realizó desde 0.1 hasta 100 rad/s. Los resultados se obtuvieron en forma de gráficas y datos numéricos de algunos parámetros reológicos, tales como módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') en pascales (Pa) y tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$), en función de la frecuencia. Para la optimización del proceso de extrusión se escogieron los valores a la frecuencia donde mostraron una estabilidad.

Elaboración de las Tortillas

Se mezclaron 2 kg de harina extrudida y agua destilada, de acuerdo a la capacidad de agua subjetiva obtenida para cada una , en una mezcladora industrial marca Hobart, modelo AS2001 serie 11-276-505, para elaborar las

tortillas. Las masas obtenidas se empacaron en bolsas de polietileno para ser trasladadas inmediatamente a una tortillería comercial (Tortillería Proveedor de Hermosillo). Se utilizó una máquina de rodillos (marca Rodotec, modelo RT-100), con molde de 14 cm, ajustándose a un peso de 25 g y cociéndolas en un horno de 3 zonas, cuya temperatura promedio en cada una fue: zona 1, 270 ± 10 °C; zona 2, 320 ± 30 °C y zona 3, 300 ± 25 °C, con un tiempo de residencia de 45 s. Inmediatamente las tortillas fueron colocadas en una banda transportadora (marca Trigotec, modelo TT-100), equipada con abanico para su enfriamiento a temperatura ambiente (25°C), con un tiempo de residencia de 65 s. Se empacaron en bolsas de polietileno y se cerraron con una selladora de resistencia eléctrica (sin marca) para su traslado al laboratorio de Reología del Departamento de Investigación y Posgrado de la Universidad de Sonora para sus evaluaciones correspondientes. Las tortillas de nixtamal fueron adquiridas en una tortillería comercial de la localidad (Tortillería La Indita) y enfriadas en el laboratorio por media hora a 25°C, sin circulación de aire forzado y empacadas en bolsa de polietileno.

Evaluación de las Tortillas

Características físicas

Se evaluaron las 3 características físicas de la tortilla como son: peso, diámetro y su espesor.

Propiedades texturales

La firmeza y rollabilidad en tortilla fueron evaluadas a diferentes tiempos de almacenamiento (2, 24 y 48 h).

Firmeza. Es un parámetro que nos indica la dureza que presenta la tortilla (Ramirez –Wong y Ortega, 1994). Se utilizó un texturómetro (marca Instron, modelo 4465, Canton, MA, USA), al cual se le conectó la celda de Kramer, colocándose una pieza del centro de la tortilla de área de 41.47 cm^2 . Se utilizó la celda de carga de compresión y tensión de 500 kg, la velocidad del cabezal fue de 50 cm/min. La firmeza se expresó como el esfuerzo máximo en kg_f , y fue corregido por el espesor de la tortilla.

Rollabilidad. Es un parámetro que nos indica la flexibilidad que presenta la tortilla (Suhedro *et al.*, 1998) De cada tortilla a evaluar fueron cortadas cinco tiras de 2 cm de ancho. Cada tira de tortilla fue enrollada en un cilindro de madera de 2 cm de diámetro y fue observado el grado de ruptura, para lo cual se estableció una escala de 1 a 5, en donde se dio 5 a la tortilla que no se rompió, 3 si se rompió de manera parcial, y 1 si se rompió completamente (Waniska, 1976).

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Para el diseño experimental se utilizó la metodología de superficie de respuesta [MSR] (Myers, 1971; Montgomery, 1991). Los datos reportados en la literatura y los resultados de los ensayos preliminares se tomaron en consideración para seleccionar el número y niveles de variación de las variables de proceso: temperatura de la cuarta zona del extrusor (T, 110-130 °C), humedad de acondicionamiento del maíz molido (H, 25-35%) y concentración de goma xantana (GX, 0.3-0.7 % en relación al maíz molido, p/p). Se utilizó un diseño de composición central rotatable con tres factores y 5 niveles (Myers, 1971; Montgomery, 1991), tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla2. Combinaciones de temperatura de extrusión (T), humedad de acondicionamiento (H) y concentración de goma (GX) utilizadas para la optimización del proceso de extrusión de maíz.

Ensayo ^a No	Variables de proceso ^b		
	T (X ₁)	H (X ₂)	GX (X ₃)
1	110 (-1)	25 (-1)	0.30 (-1)
2	130 (+1)	25 (-1)	0.30 (-1)
3	110 (-1)	35 (+1)	0.30 (-1)
4	130 (+1)	35 (+1)	0.30 (-1)
5	110 (+1)	25 (-1)	0.70 (+1)
6	130 (-1)	25 (-1)	0.70(+1)
7	110(-1)	35 (+1)	0.70(+1)
8	130(+1)	35 (+1)	0.70(+1)
9	103.18 (-1.681)	30 (0)	0.50(0)
10	136.82 (1.681)	30 (0)	0.50(0)
11	120 (0)	21.59 (-1.681)	0.50 (0)
12	120(0)	38.41(1.681)	0.50 (0)
13	120(0)	30 (0)	0.16 (-1.681)
14	120(0)	30 (0)	0.84 (1.681)
15	120(0)	30 (0)	0.50 (0)
16	120(0)	30 (0)	0.50 (0)
17	120(0)	30 (0)	0.50(0)
18	120(0)	30 (0)	0.50(0)
19	120(0)	30 (0)	0.50(0)
20	120(0)	30 (0)	0.50(0)

^a Orden al azar

^b T = Temperatura de extrusión (°C), H= Humedad de acondicionamiento (%), GX= concentración de goma (%), valores entre paréntesis son los niveles codificados

Las condiciones que se mantuvieron de manera constante fueron el diámetro de la matriz del extrusor (3mm), la concentración de cal (0.3% p/p), el tipo de tornillo seleccionado (con una relación de compresión 1:1), velocidad de alimentación al extrusor (45 rpm) y la temperatura de las tres primeras zonas del extrusor (60°C) y el tamaño de partícula del maíz molido.

Para todas las determinaciones se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de un factor, donde cada factor es el tratamiento (análisis realizado) con un nivel de significancia de 0.05 ($p < 0.05$). Para observar las diferencias entre tratamientos específicos, se utilizó la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 0.05 ($p < 0.05$) en donde los valores con letras iguales no presentan diferencia significativa. Para observar el efecto entre cada tratamiento se calculó el coeficiente de correlación simple a un nivel de significancia de $p = 0.05$. El análisis estadístico se realizó utilizando el paquete SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 1999).

Optimización del Proceso de Extrusión

Para encontrar la mejor combinación de las variables de proceso, para la obtención de harina de maíz extrudido, se aplicó el método convencional gráfico (maximizando IAA, $\tan \delta$; Minimizando G' , G'' y F_{\max}). Las gráficas de contorno de cada una de las variables de respuesta se utilizaron, a través de la metodología de superposición de superficies, para obtener gráficas de contorno para la observación y selección de la mejor combinación de T, H, y GX para obtener harina de maíz extrudido.

El modelo de la Fig. 9 muestra la relación entre las variables de proceso o independientes ($X_1 =$ temperatura de extrusión, $X_2 =$ Humedad de

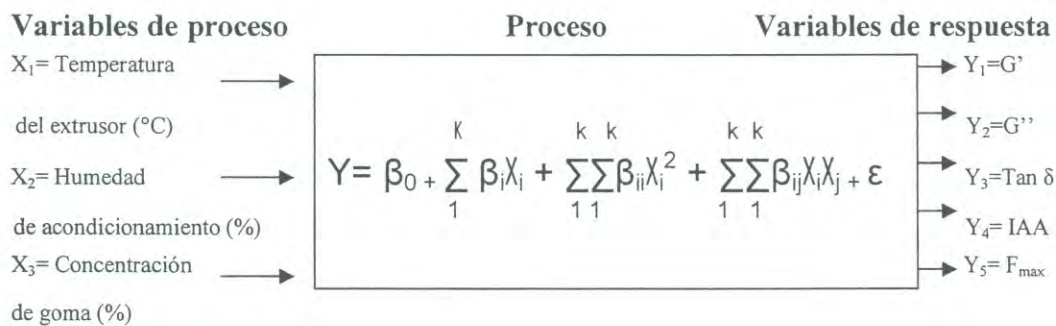


Figura 9. “Caja negra” del modelo matemático que muestra la relación entre variables de proceso y de respuesta del proceso de extrusión del maíz.

acondicionamiento, X_3 = Concentración de goma) y las variables de respuesta o dependientes [Módulo de almacenamiento (G'), Módulo de Pérdida (G''), Tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$), Fuerza máxima (F_{\max}) a las dos horas de almacenamiento e Índice de Absorción de Agua (IAA) mediante un polinomio de segundo orden.

La expresión dentro de la “caja negra” representa G' , G'' , $\tan \delta$, IAA y F_{\max} cuando el valor de “k” cambia de 1 a 5; β_0 , β_i , β_{ii} y β_{ij} representan la constante (intercepto) y coeficiente del efecto lineal, cuadrático e interactivo, respectivamente; χ_i , χ_i^2 y $\chi_i\chi_j$ representan los efectos lineal, cuadrático e interactivo de las variables independientes, respectivamente, y “ ε ” representa el error experimental. Se aplicó análisis de regresión a los valores de las variables de respuesta obtenidas experimentalmente, los términos no significativos ($p \leq 0.01$) se eliminaron y se recalculó un nuevo polinomio (modelo de predicción) para cada una de las variables de respuesta (Khuri y Cornell, 1987). El análisis de los datos y la obtención de las gráficas de superficie de respuesta y de contorno se hicieron con la ayuda del software Design Expert versión 6.0.7 (Design Expert, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la Materia Prima

La composición química del grano de maíz utilizado y la harina de maíz nixtamalizada comercial (Maseca) se muestran en la Tabla 3. Se encontraron valores similares del grano en estudios realizados por Enríquez-Ramos (2004), Silva (1998), Vásquez (1995), y Watson (1987). En la harina comercial Maseca presentaron similitud a los resultados obtenidos por Bedolla y Rooney (1984), Bello-Perez *et al.* (2002), Flores-Farias *et al.* (2002), y Galicia (2005). El contenido de carbohidratos fue similar tanto para el grano como para la harina comercial. Las pequeñas variaciones que se presentan pueden ser atribuidas a las variaciones naturales y condiciones agronómicas de los cultivos (Bedolla y Rooney, 1984).

Expansión de los Extrudidos

En la Tabla 4, se presenta el análisis de varianza de la expansión del extrudido, donde se puede observar que el tratamiento afectó muy significativamente ($p < 0.01$) a esta característica. En la Tabla 5 se presentan los valores promedio del porcentaje de expansión de los extrudidos de cada tratamiento. No se presentó expansión en varios tratamientos (3, 4, 7, 8, 12 y 13). El valor máximo lo presentó el tratamiento 11 con un 7.53%, cuyas condiciones fueron de las de acondicionamiento de humedad más bajo (21.59%) a una temperatura de 120°C y una concentración de goma de 0.5%. La diferencia de los valores de expansión entre los tratamientos fue probablemente determinada por el contenido de humedad de acondicionamiento, tal como lo menciona Zazueta-Morales *et al.* (2002). Camire y Clydesdale (1981), mencionan que, a

Tabla 3. Composición química de maíz y de la harina comercial

Determinación	Maíz ¹	HMNC ²
Humedad (%)	7.24 ³ ± 0.09 ⁴	8.96 ³ ± 0.09 ⁴
Cenizas (%)	1.45 ± 0.03	1.35 ± 0.01
Grasas (%)	5.71 ± 0.04	5.25 ± 0.08
Proteínas ⁵ (%)	8.65 ± 0.15	8.05 ± 0.25
Carbohidratos ⁶ (%)	76.95	76.39

¹Maíz blanco comercial.

²HMNC= Harina de maíz nixtamalizada comercial.

³Los valores son el promedio de tres repeticiones en base seca.

⁴Desviación estándar.

⁵Base seca (factor de conversión: Nx5).

⁶Se obtuvieron por diferencia.

Tabla 4. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la expansión de los extrudidos de la harina de maíz.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F
Tratamiento	19	19.20**
Error	180	
Total	199	

**=Muy significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p < 0.01$)

Tabla 5. Expansión de los extrudidos de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	EE ¹ (%)
1	4.5 ² c ³ ,b
2	1.6 e,d
3	0.0 e
4	0.0 e
5	3.0 c,b,d
6	4.9 b
7	0.0 e
8	0.0 e
9	2.2 c,e,d
10	1.5 e,d
11	7.5 a
12	0.0 e
13	0.7 e,d
14	2.2 c,e,d
15	1.5 e,d
16	1.4 e,d
17	0.5 e
18	0.6 e
19	1.9 e,d
20	0.3 e
Promedio Global	1.7
DMS ⁴	2.5

¹EE= Expansión de los extrudidos.

²Valores promedio de diez repeticiones.

³Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

⁴DMS=Diferencia mínima significativa.

concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mayores a 0.1% se promueven la formación de complejos con el almidón lo que hace que se disminuya la expansión.

Evaluación de las Harinas

Humedad

El ANDEVA (Tabla 6) para el contenido de humedad en las harinas analizadas presentó una diferencia muy significativa ($p < 0.01$) entre los tratamientos. En la Tabla 7 se muestra que la harina de maíz molido presentó un valor menor (7.2%) significativo tanto con la comercial como con la de los tratamientos, siendo la de éstos mayores que la comercial, la cual presentó un valor de 8.9%, excepto la de los tratamientos 14 y 19, que no presentaron diferencia significativa. Resultados similares en harinas nixtamalizadas por extrusión y comerciales fueron reportados por diferentes autores (Almeida-Domínguez *et al.*, 1996; Bello-Pérez *et al.*, 2002; y Galicia, 2005), quienes muestran intervalos de humedad para estos productos de 6.7 % y 11.7 %.

Distribución del tamaño de partícula

En la Tabla 8, se presenta el análisis de varianza de la retención de material en las diferentes mallas. Esta determinación fue afectada muy significativamente ($p < 0.01$) por el tipo de tratamiento en cada malla. En la Tabla 9, se presentan los valores de los materiales retenidos en la distribución de tamaño de partícula en las diferentes mallas, así como los del índice de tamaño de partícula (ITP).

Tabla 6. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la humedad de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F
Tratamiento	21	96.29**
Error	44	
Total	65	

**=Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($P<0.01$).

Tabla 7. Humedad de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	HH ¹ (%)
1	9.6 ² i ³ , j
2	11.2 b,c,d
3	11.6 a,b
4	10.6 d,e,f,g
5	11.8 a
6	10.7 d,e,f
7	11.6 a,b
8	11.2 b,c,d
9	9.6 i, j
10	10.8 d,e
11	10.0 g,h,i
12	11.4 a,b,c
13	10.1 f,g,h,i
14	9.3 j,k
15	9.6 i, j
16	10.5 e,f,g,h
17	9.9 h,i,j
18	9.6 i, j
19	8.9 k
20	10.9 d,e,c
MASECA	8.9 k
MAIZ	7.2 l
Promedio Global	10.2
DMS ⁴	0.6

¹HH=Humedad de harina.

²Valores promedio de tres repeticiones.

³Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

⁴DMS=Diferencia mínima significativa.

Tabla 8. Andeva, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la distribución de tamaño de partícula en las diferentes mallas e índice de tamaño de partícula de la harinas de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F DTP ¹ en malla #					Valor de F
		+40	+60	+80	+100	-100	ITP ²
Tratamiento	21	133.8**	33.5**	236.7**	220.8**	1797.3**	218.1**
Error	22						
Total	43						

**Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

¹ DTP= Distribución de tamaño de partícula.

² ITP= Índice de tamaño de partícula.

Tabla 9. Material retenido en la distribución de tamaño de partícula en las diferentes mallas e índice de tamaño de partícula de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	Material retenido en la malla #					ITP ¹
	+40	+60	+80	+100	-100	
1	21.0 ² j ³	65.5 ² c, ³ d,e,f,	8.3 ² c ³	4.8 ² b ³	0.4 ² b ³	59.8 ² b ³
2	31.0 b,c	65.8 e,f	1.6 i,j,k	1.5 e,f,g,h,i, j	0.1 c,d	54.7 h,i,j
3	30.7 d,c	65.6 b,c,d,e,f	3.0 f,g,h	0.7 j,k,l	0 d	54.7 f,g,h,i,j
4	31.1 b,c	67.4 b,c,d	0.8 k,l	0.7 i,j,k,l	0 d	54.2 f,g,h,i
5	28.8 c,d,e,f	65.5 b,c,d,e,f	3.7 d,e,f	2.0 d,e,f,g	0 d	55.7 c,d,e,f
6	26.9 d,e,f,g,h	68.5 b,c,d	3.3 e,f,g	1.3 f,g,h,i,j	0 d	55.8 c,d,e,f,g
7	25.3 e,f,g,h,i	69.6 b,c	2.8 f,g,h	2.3 c,d,e	0 d	56.4 e,f,g,h,i
8	29.0 c,d,e	70.6 b,c	0.2 l	0.2 l	0 d	54.3 i,j,k
9	27.9 c,d,e,f,g	68.5 b,c,d,e,f	3.5 e,f	1.3 f,g,h,i,j	0 d	56.3 g,h,i,j
10	37.5 a	60.6 g	1.6 i,j,k	0.3 k,l	0 d	52.9 k
11	29.0 d,e,c	67.7 b	2.2 g,h,i,j	1.0 h,i,j,k,l	0 d	54.9 d,e,f,g,h
12	30.2 d,c	64.5 c,d,e,f	4.2 d,e	1.1 g,h,i,j,k	0 d	55.2 e,f,g,h
13	28.6 c,d,e,f	65.6 e,f	4.2 d,e	1.6 e,f,g,h,i	0 d	55.7 e,f,g,h
14	34.6 a,b	62.9 f	1.4 j,k	1.1 f,g,h,i,j,k	0 d	53.8 j,k
15	22.8 i,j	70.8 c,d,e,f	3.2 e,f,g,h	3.2 c	0 d	57.3 c,d,e
16	26.2 e,f,g,h,i	68.9 b	2.6 f,g,h,i	2.0 d,e,f	0.3 b,c	56.2 c,d
17	25.1 f,g,h,i	70.6 b	2.1 h,i,j	2.2 d,e	0 c,d	56.2 c,d,e,f,g
18	23.0 i,j	71.2 b,c,d,e	3.4 e,f	2.4 c,d,e	0 c,d	57.0 c,d,e
19	23.2 h,i,j	65.3 d,e,f	9.6 b	1.9 d,e,f,g,h	0 d	58.0 c
20	24.6 h,i,j	68.2 b,c,d,e	4.6 d	2.6 c,d	0 d	57.0 c,d,e
Maseca	0.00 l	63.1 e,f	13.5a	12.0 a	11.4 a	72.0 a
Maíz	12.9 k	78.8 a	5.5 e,f	2.8 d,e,f,g	0 d	59.6 b
Promedio Global	25.9	64.6	3.8	2.2	0.5	54.3
DMS ⁴	3.8	4.0	1.1	0.9	0.3	1.6

¹ITP=Índice de tamaño de partícula.

²Valores promedio de 3 repeticiones.

³Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 (p<0.05).

⁴DMS=Diferencia mínima significativa.

En la malla # 40 (420 μm), la harina de maíz molido presentó una retención de material del 12.9% y la de los tratamientos mayores que la de éste valor, siendo la del tratamiento 10 ($T=136^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$) el máximo retenido (37.5%) y el mínimo (21%) correspondiente a el tratamiento 1 ($T=110^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.3$). La harina comercial en esta malla no tuvo material retenido.

En la malla # 60 (250 μm), la harina de maíz (sin tratamiento) presentó el valor máximo (78.8%) y con diferencia significativa ($p<0.05$) al resto de los tratamientos, incluido la de la harina comercial, la cual tuvo un valor de 63.1%. Cabe mencionar que la mayor parte de los tratamientos no tuvo diferencia significativa ($p<0.05$) con la comercial en esta malla.

En la malla # 80 (177 μm), la harina comercial presentó el valor máximo (13.5%) y con diferencia significativo ($p<0.05$) al resto de los tratamientos. El valor mínimo (0.2%) lo presentó el tratamiento 8 ($T=130$, $H=35\%$, $GX=0.7\%$). El promedio global fue de 3.8% y una diferencia mínima significativa de 1.1.

Así mismo, en la malla #100 (149 μm), en la harina comercial se tuvo el valor máximo (12.05%) y con diferencia significativa ($p<0.05$) al resto de los tratamientos. El valor mínimo también correspondió al tratamiento 8.

En la malla # -100 (fondo), la harina comercial presentó el valor máximo (11.4%) y el resto de los tratamientos no mostró material retenido alguno, es decir 0%, excepto los tratamientos 1, 2, 16, 17 y 18 que presentaron cantidades pequeñas (0.03-0.43%).

Como se observó en las HMNE presentaron una mayor distribución de tamaño de partícula en las mallas # 40 y # 60 y la comercial en la malla # 60, la cual mostró una distribución uniforme en el resto de las mallas, lo que nos indica que puede presentar diferente funcionalidad (Sahai *et al.*, 2001). Estos valores influyeron de manera importante en los valores obtenidos del ITP, presentando la

harina comercial un valor mayor significativo ($p \leq 0.05$) que las HMNE, indicando que las comerciales tienen partículas de menor tamaño que las HMNE.

Índice de tamaño de partícula

En la Tabla 8, se presenta el análisis de varianza del índice de tamaño de partícula. Se observa que el ITP fue afectado muy significativamente ($p < 0.01$) por el tratamiento.

En la Tabla 9, se presenta el valor máximo (72) del ITP que correspondió para la harina comercial, presentando una diferencia significativa ($p < 0.05$) al resto de los tratamientos. El valor mínimo (50.1) fue para el tratamiento 10 ($T=136.82^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5$). Valores similares para la harina comercial se obtuvieron en los estudios de Galicia (2005) y de González (2006).

Tanto la harina comercial, como la mayor parte de las harinas nixtamalizadas por extrusión (1, 7, 15, 17, 18, 19 y 20) cumplen con las condiciones de granulometría que la Norma mexicana (NMX-F-046-S-1980) establece en la que el 75% de la harina debe pasar a través de una malla de número 60.

Algunos factores como la dureza del grano, tiempo de nixtamalización, cantidad de cal empleada, tiempo de reposo, tipo de molienda, y cribado, son factores que influyen en el tamaño de partícula obtenido (Flores-Farias *et al.*, 2002. Bedolla y Rooney (1984), revelan que la fracción fina es la responsable de la mayor parte de la absorción de agua y el desarrollo de viscosidad durante el mezclado. Mientras que la principal función de la fracción gruesa es reducir el exceso de blandura, o la formación de grandes burbujas de aire durante el cocimiento o el freído. Gómez *et al.* (1992), indican que las tortillas necesitan

hacerse con harinas nixtamalizadas con un tamaño de partícula fino, para que éstas presenten cohesividad en la masa y una aceptable rollabilidad en el producto final.

Índice de absorción de agua

En la Tabla 10, se muestra el análisis de varianza sobre el índice de absorción de agua en los tratamientos. Se observa que el IAA fue afectado muy significativamente ($p < 0.01$) por el tratamiento. De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 11), el menor valor lo presentó el maíz molido con 1.5 g de gel/g de materia seca, en tanto que el valor mayor fue observado en la harina comercial con 3.7 g de gel/g de materia seca, mostrando no diferencia significativa ($p < 0.05$) con la mayor parte de los tratamientos (3-10 y del 14-19), cuyo rango de valores fue de 2.2-3.6 g de gel/g de materia seca.

Los resultados del IAA a través de este estudio muestran que las harinas obtenidas por el proceso de nixtamalización por extrusión presentan una capacidad de absorción cercana al doble de la harina utilizada y que a altas concentraciones de goma xantana (0.84% correspondiente al tratamiento 14) se presentó el valor máximo entre los tratamientos (3.6 g de gel/g de materia seca), indicando así la capacidad de la goma para formar geles.

Varios autores (Galicia, 2005; Gómez y Aguilera, 1983; González, 2006; y Martínez-Bustos *et al.*, 1996) muestran resultados similares a los observados en el maíz molido integral, encontrando rangos de valores entre 1.6 a 1.9 g gel/g de materia seca. Galicia (2005), reporta rangos de valores de IAA en harinas de maíz extrudidas de 2.58 a 3.54 g gel/g de materia seca, cuyo rango es similar al obtenido en esta investigación. Flores-Farias *et al.* (2002), reportan valores de IAA en harinas comerciales de 2.7 a 3.7 g gel/g de materia seca, y Ramirez-Wong *et al.* (1994) de 2.65 a 3.80 g gel/g de materia seca.

Tabla 10. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre índice de absorción de agua e índice de material soluble de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F	
		IAA ¹	IMS ²
Tratamiento	21	21.67**	4.42**
Error	44		
Total	65		

¹IAA=Índice de absorción de agua.

²IMS=Índice de material soluble.

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

Tabla 11. Índice de absorción de agua e índice de material soluble de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	IAA ¹ (g de gel/g muestra seca)	IMS ² (%)
1	3.0 ³ b ⁴ ,c,d,f,g	4.7 ³ b ⁴ ,c
2	2.8 e,f,g,h	4.7 c
3	3.2 a,b,c,d,e	6.1 a,b,c
4	3.3 a,b,c,d,e	5.2 b,c
5	2.6 f,g,h	4.6 c
6	2.2 h	5.4 a,b,c
7	3.4 a,b,c,d,e	5.8 a,b,c
8	3.2 a,b,c,d,e	6.5 a,b
9	3.5 a,b,c	5.4 a,b,c
10	3.4 a,b,c,d	5.0 b,c
11	2.5 g,h	6.3 a,b,c
12	2.9 d,e,f,g	7.1 a
13	3.0 c,d,e,f,g	5.2 b,c
14	3.6 a,b	5.9 a,b,c
15	3.4 a,b,c,d	4.6 c
16	3.2 a,b,c,d,e	5.3 a,b,c
17	3.5 a,b,c	4.8 b,c
18	3.5 a,b,c	4.9 b,c
19	3.2 a,b,c,d,e	4.7 b,c
20	3.1 a,b,c,d,e,f	5.1 b,c
MASECA	3.7 a	4.9 b,c
MAIZ	1.5 i	6.3 a,b,c
Promedio Global	3.1	5.4
DMS ⁵	0.5	1.8

¹IAA=Índice de absorción de agua.

²IMS=Índice de material soluble.

³Valores promedio de tres repeticiones.

⁴Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

⁵DMS=Diferencia mínima significativa

Las diferencias observadas de IAA entre el maíz molido y las harinas extrudidas puede ser atribuida a que el constituyente (gránulos de almidón) mayoritario del maíz en forma nativa tan solo puede absorber 0.4 veces su peso en agua, por lo que cuando este componente se ve modificado por efectos de una serie de operaciones que modifican su estructura interna, los grupos hidrofílicos de las moléculas de sus constituyentes quedan accesibles para ligar moléculas de agua, por lo que la capacidad de absorción de agua tiende a incrementarse a un cierto nivel limite (González, 2006).

Índice de material soluble

El análisis de varianza para observar las diferencias entre tratamientos sobre el índice de material soluble se muestra en la Tabla 10. El tratamiento afectó de una manera muy significativa ($p < 0.01$) al IMS. En la Tabla 11 se observa un valor máximo de 7.1%, correspondiente al tratamiento 12 (T=120, H=38.4%, GA=.5%) y el mínimo de 4.6% del tratamiento 15 (T=120°C, H=30%, GA=0.5%). El valor de la harina comercial (4.9%), no presentó diferencia estadística con la mayor parte de los tratamientos.

Arámbula *et al.* (1998) menciona que el aumento de humedad y temperatura produce un incremento en el índice de material soluble en el proceso de extrusión para la elaboración de harinas de maíz nixtamalizadas extrudidas y por lo tanto masas más adhesivas, indicando así tortillas con más firmeza.

Los valores del IMS obtenidos de la harina comercial se encuentra dentro de los reportados por Flores-Farías *et al.* (2002), González (2006), y Galicia (2005). El maíz molido presentó un valor de 6.3%, siendo menor que los reportados por González (2006) y de Galicia (2005), que reportaron valores de 10.3% y de 9.5%, respectivamente, esto puede deberse al efecto de molienda (Campas-Baypoli, 1997). El valor de las harinas extrudidas se encuentra en el rango de los obtenidos por Galicia (2005).

Las diferencias observadas entre los tratamientos y la de maíz molido pueden ser debido a que en la molienda una proporción considerable de gránulos de almidón es fragmentada físicamente, lo que genera una mayor cantidad de material soluble en el medio (Gómez et al., 1990; González, 2006).

Capacidad de absorción de agua subjetiva

Al llevarse el ANDEVA, que se presenta en la Tabla 12, para ver las diferencias entre los tratamientos sobre la capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS), en donde se muestra que esta determinación fue afectada muy significativamente ($p < 0.1$) por el tipo de tratamiento. En la Tabla 13, se presentan los valores de la CAAS de harina de maíz en los tratamientos. El valor de la harina comercial (129.3 ml agua/100 g de harina) fue mayor significativamente ($p \leq 0.05$) al de las HMNE, las cuales presentaron un rango de 74.8 - 89 ml agua/100 g harina.

Bedolla y Rooney (1984) y Flores-Farias *et al.* (2002) reportan valores de absorción en harinas comerciales de 120-150 ml agua/100 g de harina. Tendencias similares de la harina comercial con respecto a las extrudidas fueron obtenidas por González (2006) y Galicia (2005). Arámbula *et al.* (1999) reporta que con harinas extrudidas y con la goma xantana se obtuvo una mayor CAAS (88.5 ml/100g) que con las demás gomas utilizadas como la arábica, guar y la Carboximetilcelulosa, valor similar a los arrojados en esta investigación. Sin embargo, el valor de la harina extrudida por González (2006) de 72 ml agua/100 g de harina fue menor, debido a que fue utilizada la goma xantana en todos los tratamientos de esta investigación. Esta goma cumplió su función, afectando en la retención de agua, tal como Arámbula *et al.* (1999) y Yau *et al.* (1994) atribuyen que las gomas se adicionan en las industrias de harinas nixtamalizadas para mejorar la funcionalidad de dicho producto. Cabe mencionar que debido a la distribución de tamaño de partícula de la harina comercial que es menos gruesa en relación a las extrudidas, por ser de harinas integrales, afectó de una

Tabla12. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la capacidad de absorción de agua subjetiva en harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F
Tratamiento	20	245,9**
Error	42	
Total	62	

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p < 0.01$).

Tabla 13. Capacidad de absorción de agua subjetiva en harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	CAAS ¹ (ml agua/100 g de harina)
1	76.9 ² f ³ g
2	77.0 f,g
3	76.3 f,g
4	78.6 f,g
5	74.8 g
6	79.6 d,e,f
7	79.0 e,f
8	79.6 d,e,f
9	82.8 d,e
10	76.6 f,g
11	80.1 d,e,f
12	79.0 e,f
13	83.1 c,d
14	89.0 b
15	87.3 b
16	87.0 c,b
17	87.3 b
18	87.0 b,c
19	87.3 b
20	87.0 b,c
MASECA	129.3 a
Promedio Global	84.0
DMS ⁴	3.8

¹ CAAS=capacidad de absorción de agua subjetiva.

² Valores promedio de tres repeticiones.

³ Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

⁴ DMS=Diferencia mínima significativa.

manera considerable en su rendimiento como absorción de agua, tal como lo menciona Ramirez-Wong (1989).

Color

Luminosidad. En la Tabla 14, se muestra el análisis de varianza para la luminosidad (L) de la harina en los tratamientos. Se observa que el color de las harinas fue afectada muy significativamente ($p \leq 0.01$) por el tratamiento. En la Tabla 15, se observa que el valor promedio fue de 71.1 y la diferencia mínima significativa fue de 10.6, con un rango de 62.1-76.4, correspondiendo el valor mínimo al de la harina comercial y el máximo al tratamiento 6 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=.7\%$), el cual no presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) con el resto de los tratamientos, excepto con el 11 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=21.59\%$, $GX=0.5\%$) y la harina comercial, la cual no presentó diferencia con la de maíz molido. Los valores del rango obtenido fueron similares a los encontrados por Galicia (2005), Pons (2004), y González (2006).

Pons (2004), menciona que la tendencia al obscurecimiento en la harina de maíz nixtamalizada extrudida se ve favorecido al incrementarse la temperatura, el porcentaje de humedad de acondicionamiento y la velocidad del tornillo. Sin embargo, en esta investigación no se presentó una tendencia significativa en la mayor parte de los tratamientos debido posiblemente a que la velocidad de tornillo se mantuvo constante.

Bazúa *et al.* (1979) encontraron que la concentración de cal afecta el color de las harinas de maíz obtenidas por los procesos de extrusión y nixtamalización. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación evidenciaron que la mayoría de los valores de L de harina de maíz blanco extrudido (con 0.3 % de cal en peso al grano p/p) fueron similares a los de harina de maíz comercial.

Tabla 14. Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la luminosidad y tendencia al amarillo de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F	
		L ¹	b ¹
Tratamiento	21	1.73NS	6.7**
Error	44		
Total	65		

NS=No significativo a un nivel de $p=0.05$ ($p < 0.05$)

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p < 0.01$).

¹L=Luminosidad; b=Tendencia al color amarillo (medidos en la escala de Hunter Lab).

Tabla 15. Luminosidad y tendencia al amarillo de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	L ¹	b ¹
1	67.5 ² a ³ ,b,c	11.4 ² b ³ c,d
2	74.1 a,b	13.3 a,b
3	70.2 a,b,c	12.0 a,b,c
4	68.1 a,b,c	12.2 a,b
5	72.0 a,b,c	13.6 a
6	76.4 a	11.9 a,b,c
7	72.9 a,b	13.1 a,b
8	74.9 a,b	13.1 a,b
9	75.3 a,b	13.4 a,b
10	67.5 a,b,c	11.7 a,b,c,d
11	65.1 b,c	12.2 a,b
12	70.3 a,b,c	11.7 a,b,c,d
13	75.3 a,b	13.3 a,b
14	75.2 a,b	13.8 a
15	71.0 a,b,c	12.0 a,b,c
16	73.6 a,b	12.1 a,b
17	71.5 a,b,c	12.4 a,b
18	70.0 a,b,c	11.8 a,b,c
19	67.5 a,b,c	12.4 a,b
20	71.9 a,b,c	13.2 a,b
MASECA	62.1 c	9.7 d
MAIZ	71.6 a,b,c	10.0 c,d
Promedio global	71.1	12.3
DMS ⁴	10.6	2.1

¹ L=Luminosidad; b=Tendencia al color amarillo (medidos en la escala de Hunter Lab).

² Valores promedio de tres repeticiones.

³ Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

⁴ DMS=Diferencia mínima significativa.

Tendencia al color amarillo. En la Tabla 14, se muestra el análisis de varianza para la tendencia al color amarillo (**b**) en los tratamientos, encontrándose diferencia estadística muy significativa ($p < 0.01$). En la Tabla 15, se observan que el valor máximo del color b (13.8) correspondió al tratamiento 14 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.84\%$), sin mostrar diferencia significativa ($p < 0.05$) con el resto de los tratamientos, excepto al 1 ($T=110^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.3\%$), maíz molido, y la de harina comercial, que presentó el valor mínimo (9.7). La mayor parte de los tratamientos no presentaron diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$), ya que fueron llevados a una velocidad constante de tornillo durante la extrusión. Sin embargo, si se presentó entre éstos y los valores de la harina comercial y la del maíz crudo, indicando así estos resultados una tendencia a más amarillo en las harinas extrudidas con respecto a la comercial.

Resultados similares fueron obtenidos por Martínez-Bustos *et al.* (1996), quien encontró un rango de 6 a 10 de valores de tonalidad amarilla. Sin embargo Galicia (2005) reporta un rango de 15.3-18.5 en sus harinas extrudidas y González (2006) un valor de 14.5, indicando que sus harinas obtenidas fueron más oscuras que las de esta investigación. Arámbula *et al.* (1998), dice que aumentos en la humedad de acondicionamiento y la temperatura de procesamiento producen incrementos significativos en la tonalidad amarilla en la harina nixtamalizada extrudida.

Viscosidad amilográfica

El análisis de varianza para observar las diferencias entre los tratamientos sobre la viscosidad amilográfica se muestra en la Tabla 16. El tratamiento afectó de una manera muy significativa ($p \leq 0.05$) a la viscosidad. En la Tabla 17, se muestran los valores de viscosidad de harina en los tratamientos, donde se observa que el valor máximo se presentó en la harina comercial (1800 U.B), el

Tabla 16. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la viscosidad máxima y temperatura final de gelatinización en la harina de maíz nixtamalizada por extrusión

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F	
		μ_{\max}^1	T_f^2
Tratamiento	21	298,2**	3,85 ^{NS}
Error	22		
Total	43		

¹ μ_{\max} = Viscosidad máxima.

² T_f = Temperatura final de gelatinización.

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p < 0.01$).

^{NS} = No significativo a un nivel de $p=0.05$ ($p < 0.05$).

Tabla 17. Viscosidad máxima y temperatura final de gelatinización de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	μ_{\max}^1 (U.B.)	T_f^2 (T°C)
1	655.0 ³ b ⁴ ,c,d	79.5 ³ a ⁴
2	560.0 d,e,f	89.2 a
3	350.0 h	84.7 a,
4	350.0 h	85.5 a
5	680.0 b,c	84.5 a
6	675.0 b,c	77.2 a
7	414.0 g,h	86.2 a
8	370.0 h	88.5 a
9	539.0 e,f	87.0 a
10	577.5 c,d,e,f	89.2 a
11	720.0 b	73.2 a
12	335.0 h	77.7 a
13	477.0 f,g	85.5 a
14	625.0 b,c,d,e	88.5 a
15	580.0 c,d,e,f	87.0 a
16	540.0 e,f	82.0 a
17	477.5 f,g	77.0 a
18	531.5 e,f	90.7 a
19	480.0 f,g	83.5 a
20	511.5 f,g	88.0 a
MASECA	1800 a	87.0 a
MAIZ	112.5 i	89.6 a
Promedio Global	561.8	84.4
DMS ⁵	103.2	13.8

¹ μ_{\max} =Viscosidad máxima.

² T_f =Temperatura final de gelatinización.

³ Valores promedio de dos repeticiones.

⁴ Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$)

⁵ DMS=Diferencia mínima significativa.

menor correspondió a la del maíz crudo (112.5 U.B.), y el rango de las harinas extrudidas fue de 335-720 U.B. Los resultados fueron similares a los de González (2006), en su estudio con harina de maíz extrudida, y Silva (1998), en su trabajo con maíz crudo y masa de nixtamal, cuyo valores reportados fueron 105 U.B. y 250-550 U.B., respectivamente, cuando se considera el valor al inicio del calentamiento de las muestras a 95°C, condición a la que se obtuvieron en esta investigación.

Los valores de las harinas extrudidas fueron menores que la harina comercial, atribuyéndose esto al grado de daño que sufrió el almidón el cual fue expuesto a efectos termomecánicos, durante dicho procesamientos, tal como lo menciona Martínez-Flores *et al.* (1998). De igual forma Arámbula *et al.* (2002), se lo atribuyen al proceso, ya que en éste se realizan dos tratamientos térmicos: extrusión y deshidratación. También es debido a que la harina comercial contiene tamaño de partículas mas finos (como se observó en los valores de la distribución de tamaño de partícula) y gomas, que combinados dan una viscosidad mayor que las extrudidas, tal como lo menciona Gómez *et al.* (1987), en tamaño de partícula; Arámbula *et al.* (1999), Bell (1990) y Christianson (1982) con gomas. Así mismo, Serna-Saldivar *et al.* (1990), mencionan que la carboximetilcelulosa (CMC) utilizada en la industria de las harinas nixtamalizadas es un aditivo que incrementa los picos de viscosidad en dicho producto.

En los valores de los tratamientos 13 (T=120°C, H=30%, GX=0.16%) y 14 (T=120°C, H=30%, GX=0.84%), llevados a condiciones diferentes solamente de goma xantana, presentaron valores con diferencias significativas, tal como se observa en la Tabla 15, mostrándose así el efecto de la concentración de goma xantana en la viscosidad. Así mismo, al comparar los tratamientos 3 (T=110°C, H=35%, GX=.0.3%) y 7 (T=110°C, H35%, GX=0.7%), se observaron valores con diferencias significativas.

Temperatura final de gelatinización

Al llevarse a cabo el ANDEVA, que se presenta en la Tabla 16, para ver las diferencias entre los tratamientos sobre la temperatura final de gelatinización, se muestra que esta determinación no fue afectada significativamente ($p < 0.05$) por el tipo de tratamiento. En la Tabla 17, se presentan los valores de la temperatura final de gelatinización, donde el valor máximo de 90.7 °C, se presentó en el tratamiento 18 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$), y el mínimo (77.1 °C) en el tratamiento 11 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=21.59$, $GX=0.5$). Algunos resultados de tratamientos (1, 6, 11, 12 y 17) mostraron similitud con los reportados por González (2006) en harina extrudida, así como con los de Arámbula *et al.* (1998), que utilizaron el analizador de viscosidad rápida (RVA), método diferente al utilizado en nuestro trabajo. Silva (1998) reporta un valor de temperatura final de gelatinización de masa de nixtamal de 89.6°C, utilizando el método 22-10 de la AACCC (1990); Lim *et al.* (2003) obtuvieron una temperatura final de gelatinización de 86°C en una pasta de almidón de maíz ceroso y de 95°C en una pasta de almidón ceroso con el 1% de concentración de goma xantana, utilizando el analizador de viscosidad rápido.

Evaluación de las Masas

Humedad

En la Tabla 18, se presenta el análisis de varianza del efecto de los tratamientos sobre la humedad de la masa de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión, en donde el tratamiento afectó de una manera muy significativa ($P < 0.01$). En la Tabla 19, se muestra que la maseca presentó un valor (57 %)

Tabla18. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la humedad de masa de harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F
Tratamiento	20	295.9**
Error	42	
Total	62	

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

Tabla 19. Humedad en masas de harinas de maíz nixtamalizada por extrusión.

Tratamiento	Humedad de Masa (%)
1	49.4 ¹ i ²
2	48.0 l
3	49.6 g,h,i
4	48.4 k,l
5	48.7 j,k
6	49.5 h,i
7	50.0 f,g,h
8	50.9 d,e
9	49.5 h,i
10	47.8 l
11	49.1 i,j
12	49.7 g,h,i
13	50.1 f,g
14	51.8 c
15	51.3 c,d
16	50.9 d,e
17	50.7 e,f
18	51.4 c,d
19	51.1 d,e
20	50.9 d,e
MASECA	57.0 a
NIXTAMAL	53.4 b
Promedio Global	50.4
DMS ³	0.6

¹ Valores promedio de dos repeticiones.

² Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

³ DMS=Diferencia mínima significativa.

significativamente diferente ($p < 0.05$) con respecto al obtenido por la masa de nixtamal (53.4 %) y a la de los tratamientos que mostraron un rango de 47.8-51.8%, correspondiendo al valor mínimo al tratamiento 10 ($T = 136.82$ °C, $H=30\%$, $GX=0.5$) y al máximo al 14 ($T=120$ °C, $H=30\%$, $GX=0.84\%$). Las diferencias entre las humedades en las masas obtenidas se pueden deberse principalmente a la CAAS de la harina. Esta capacidad de retención está relacionada con la maquinabilidad de las masas así como de manera indirecta al rendimiento de tortilla, tal como lo expresa Bedolla y Rooney (1984). Ramírez-Wong (1989), también menciona que la capacidad de retención de agua en la masa se encuentra estrechamente relacionada con sus características texturales.

Bedolla y Rooney (1984) reportan un contenido de humedad en masa para la producción de tortilla de maíz de 52-69%; Ramírez-Wong *et al.* (1993) de 56 %; Ramírez-Wong *et al.* (1994) de 54.6-56.2%; Gómez *et al.* (1987) de 52-55%; y Arámbula *et al.* (1999) de 48-52%. Por lo que podemos decir que los valores obtenidos son ligeramente mas bajos que los reportados.

Propiedades viscoelásticas

En las Figs. 10, 11 y 12 se presentan el módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y de tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$), respectivamente, en función de la frecuencia de las masas de HMNE, maseca, y nixtamal. Se observa que éstos tienden a incrementar con la frecuencia, lo que significa que estos parámetros reológicos fueron dependientes de este factor.

A partir de la frecuencia de 1 rad/s los valores de tales parámetros tienden a estabilizarse, seleccionándose la de 10 rad/s para la optimización de las variables del proceso de elaboración de tortillas de HMNE. Cabe mencionar que varios tratamientos, como los que se observan en las gráficas, presentaron valores de G' , G'' y $\tan \delta$ entre los de maseca y nixtamal.

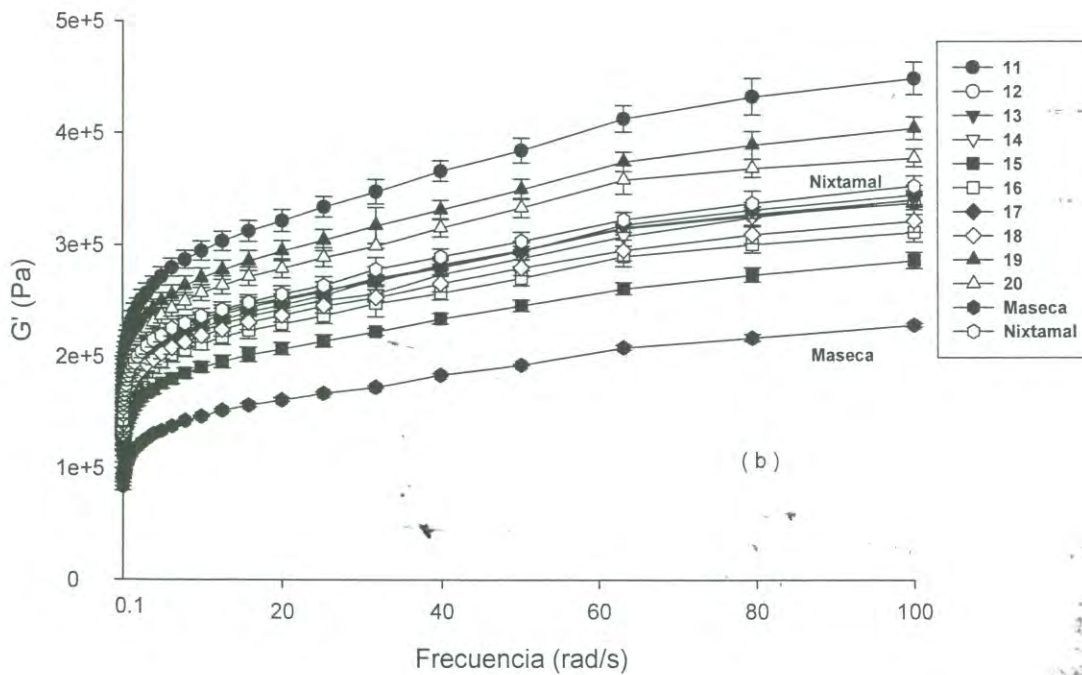
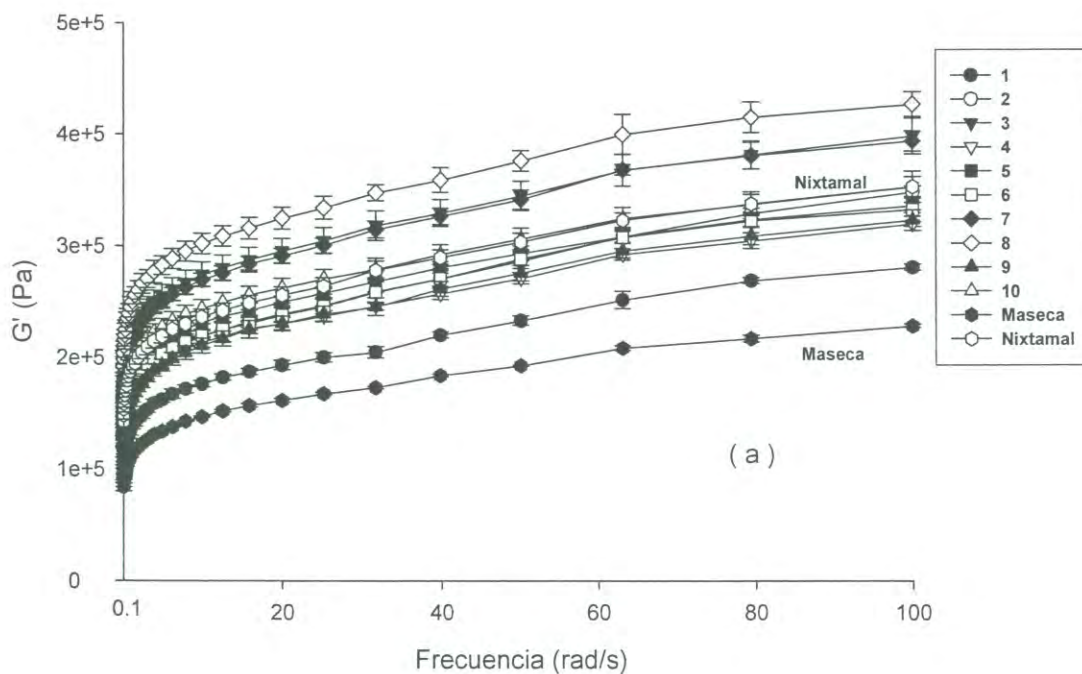


Figura 10. Módulo de almacenamiento en función de la frecuencia para las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida en los tratamientos del 1-10 (a) y 11-20 (b).

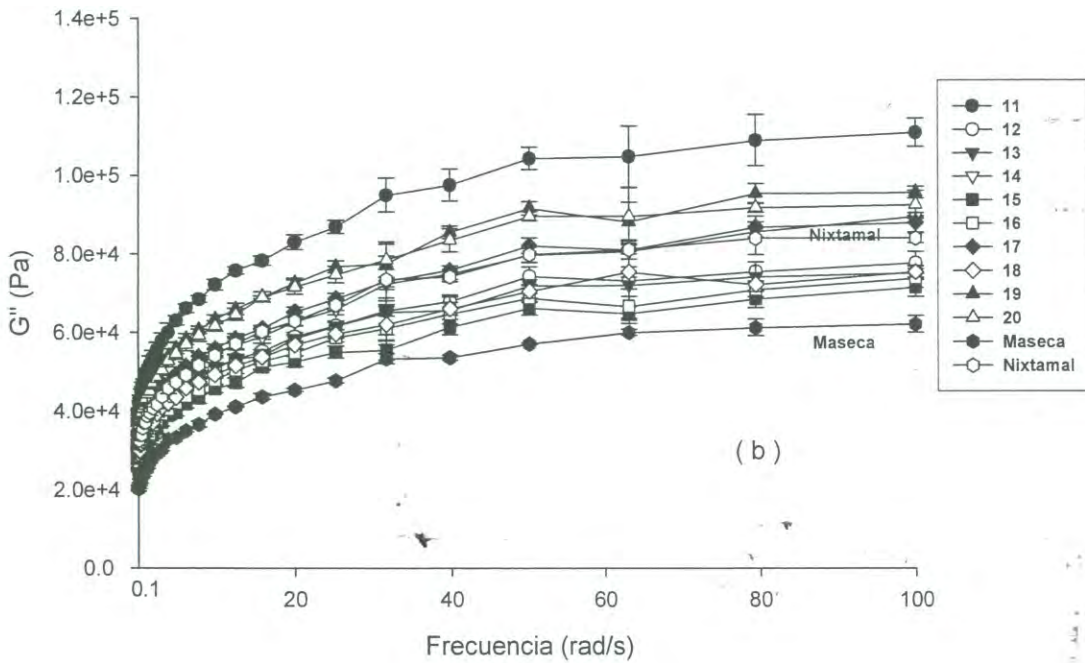
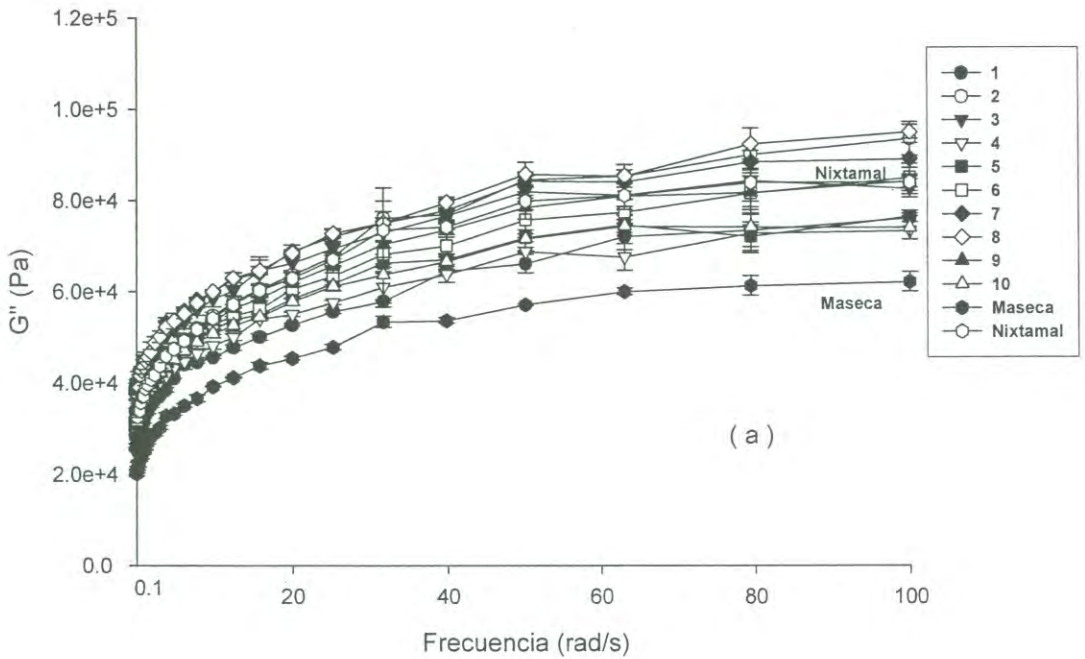


Figura 11. Módulo de pérdida en función de la frecuencia para las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida en los tratamientos del 1-10 (a) y 11-20 (b).

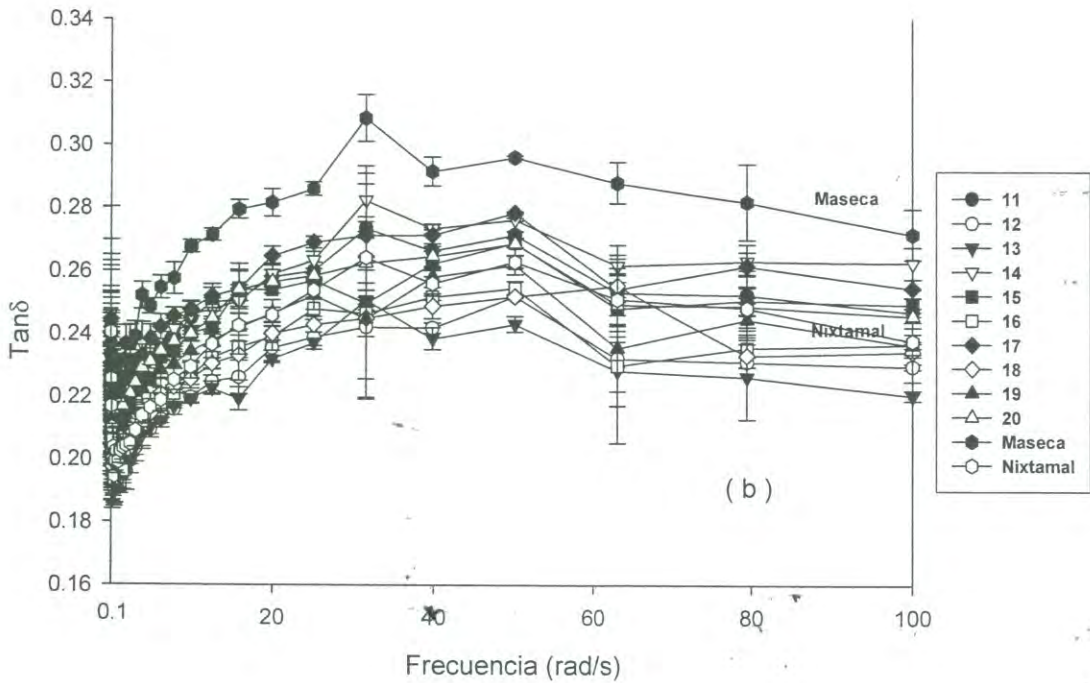
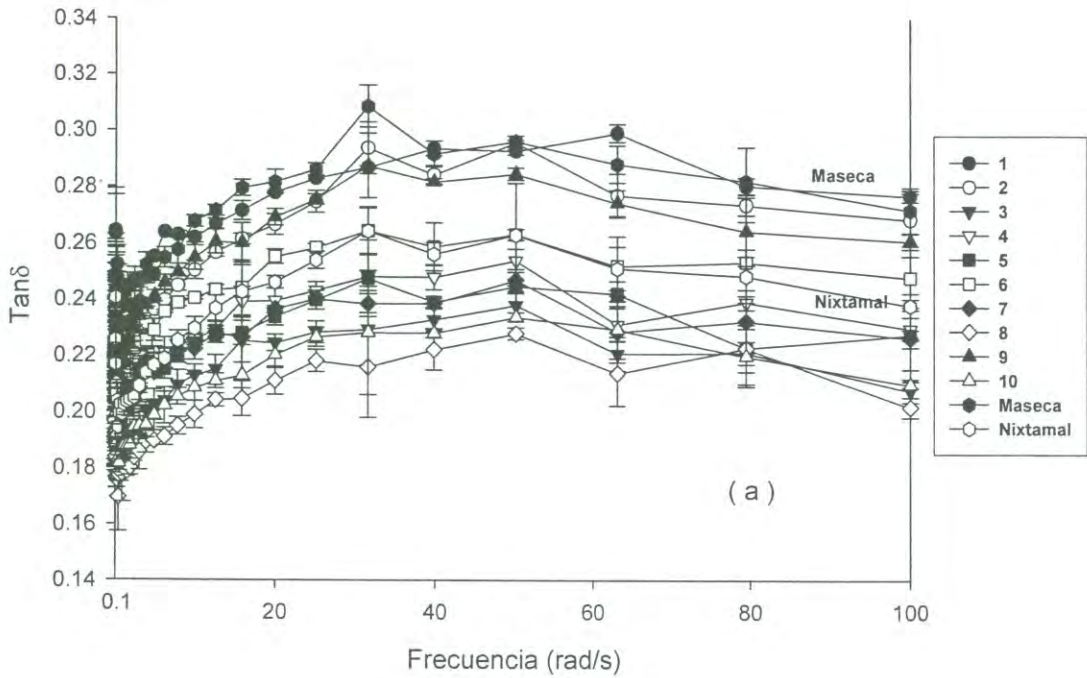


Figura 12. Tangente del ángulo de fase en función de la frecuencia para las masas de harina de maíz nixtamalizada extrudida en los tratamientos del 1-10 (a) y 11-20 (b).

Se muestra que la masa de nixtamal tiene valores mayores de G' y G'' que los presentados por la masa de harina comercial. En cuanto a $\tan \delta$, la masa de harina comercial mostró valores mayores que la de nixtamal. Las masas estudiadas dieron valores bajos de $\tan \delta$, indicando que presentaron una mayor parte elástica que viscosa. La masa de la maseca tuvo una menor parte elástica que la de nixtamal, ya que presentó valores mayores de $\tan \delta$.

En la Tabla 20, se presenta el análisis de varianza del efecto de los tratamientos de las características viscoelásticas medidas a una frecuencia de 10 rad/s en masas de HMNE, en donde el tratamiento afectó de una manera muy significativa ($P < 0.01$). En la Tabla 21, se muestran los valores promedio de las características viscoelásticas en las masas a los diferentes tratamientos, así como de las de nixtamal y maseca, medidos a una frecuencia de 10 rad/s.

En el módulo de almacenamiento (G'), el valor máximo (302,000 Pa) correspondió para el tratamiento 4 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=35\%$, $GX=0.3$), con diferencia significativa ($p < 0.05$) al resto de los tratamientos, excepto al del tratamiento 12 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=38.41^{\circ}\text{C}$, $GX=0.5\%$). El valor mínimo (176,667 Pa) lo tuvo el tratamiento 19 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$), sin diferencia significativa ($p < 0.05$) con el 16, cuyas condiciones son iguales a este tratamiento. El valor de la masa de nixtamal (236,333 Pa), no presentó diferencia significativa ($P < 0.05$) con los tratamientos 3, 5, 8, 9, 10, 13, 15 y 18. La maseca con un valor de 146,667 Pa presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) con todos los tratamientos así como con la de nixtamal.

En el módulo de pérdida (G''), el rango de valores en los tratamientos fue de 45,714 – 72,182 Pa, correspondiendo el valor máximo para el tratamiento 12, con diferencia significativa ($p < 0.05$) con el resto. El valor mínimo fue para el tratamiento 16, sin diferencia significativa ($p < 0.05$) con el 7, 14 y 19. La masa de nixtamal tuvo un valor de 54,198 Pa sin diferencia significativa ($p < 0.05$) con los tratamientos 5, 10, 15 y 20. La maseca con un valor de 39,246 Pa presentó

Tabla 20. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre las características viscoelásticas¹ a 10 rad/s en masas de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		G'	G''	Tang δ
Tratamiento	21	90.8**	150.9**	101.3**
Error	44			
Total	65			

¹Módulo de Almacenamiento (G'); Módulo de Pérdida (G'') y Tangente del ángulo de fase (Tan δ).

**Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

Tabla 21. Características viscoelásticas¹ a 10 rad/s en masas de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión.

Tratamiento	G' (Pa)	G'' (Pa)	Tang δ
1	274333 ² b ³ ,c	58360 ² d ³ ,e	0.21 ² i ³ ,j
2	269333 c	59898 c,d	0.22 g,h,i
3	223000 e,f,g,h	54833 f,g	0.24 b,c,d
4	302000 a	60018 c,d	0.19 k
5	231000 e,f,g,h	51666 h,i,j,k	0.22 g,h
6	270333 c	63323 b	0.23 e,f
7	213333 g,h	48163 l,m,n,o	0.22 f,g,h
8	234000 e,f,g	51245 i,j,k,l	0.21 h,i
9	231000 e,f,g,h	50790 j,k,l,m	0.21 h,i
10	219333 f,g,h	52724 g,h,i,j	0.24 d,e
11	257000 c,d	61632 b,c	0.23 d,e
12	294666 a,b	72182 a	0.24 c,d
13	243666 d,e	50789 j,k,l,m	0.2 j
14	211000 h,i	47797 m,n,o	0.22 f,g,h
15	218666 f,g,h	54700 f,g,h	0.25 b,c
16	190333 i,j	45714 o	0.24 d,e
17	225333 e,f,g,h	55875 e,f	0.24 b,c,d
18	218666 f,g,h	49318 k,l,m,n	0.22 f,g,h
19	176667 j	46823 n,o	0.26 a
20	210333 h,i	53505 f,g,h,i,j	0.25 b
MASECA	146667 k	39246 p	0.26 a
NIXTAMAL	236333 d,e,f	54198 f,g,h,i	0.22 f,g
Promedio Global	231681	53763	0.23
DMS ⁴	20801	3092	0.00

¹ Módulo de Almacenamiento (G'); Módulo de Pérdida (G'') y Tang δ

² Valores promedio de tres repeticiones.

³ Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 (p<0.05).

⁴ DMS=Diferencia mínima significativa.

diferencia significativa ($p < 0.05$) con todos los tratamientos y la de nixtamal. El valor máximo de $\tan \delta$ correspondió al tratamiento 19 con 0.26 con diferencia significativa ($p < 0.05$) con el resto de los tratamientos y la de nixtamal, cuyo valor fue de 0.22, sin embargo no presentó con la de maseca (0.26). El mínimo fue para el tratamiento 4, con un valor de 0.19 y con diferencia significativa ($p < 0.05$) con todos los tratamientos, maseca y nixtamal. Cabe mencionar, que la de nixtamal no presentó diferencia con los tratamientos 2, 5, 6, 7, 14 y 18.

Resultados de investigaciones del comportamiento viscoelástico se han obtenido pero en masas de trigo (González, 2005; Magaña, 2005; Masi *et al.*, 1998; Rodríguez, 2003; Safari-Ardi y Phan-Thien, 1998), mostrando comportamiento diferente en sus características a los obtenidos en esta investigación realizada con masa de maíz.

Evaluación de las Tortillas

Características físicas

En la Tabla 22, se muestra el análisis de varianza del efecto de los tratamientos sobre las características físicas como el peso, diámetro y espesor a las dos horas de almacenamiento, tiempo que son consumidas generalmente, en donde el tratamiento afectó de una manera muy significativa ($P < 0.01$). En la Tabla 23, se presentan los valores de tales características físicas. El valor máximo (25.2 g) correspondió a el tratamiento 1 ($T=110^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=30\%$), el cual no mostró diferencia significativa con el 4, 6, 7, 8, 11, 14, 16 y 17 ($p < 0.05$). El valor mínimo (21.3 g) fue para el tratamiento 13 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.16\%$), que no presentó diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) con los tratamientos 2, 3, 5, 10 y 19, así como con las elaboradas de maseca y nixtamal, cuyos valores fueron de 21.6 g y 22.1 g, respectivamente.

Tabla 22. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre las características físicas¹ de la tortilla de harina de maíz nixtamalizada extrudida a las 2 h de almacenamiento.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		P	D	E
Tratamiento	21	16.4**	2.3**	42.8**
Error	198			
Total	219			

¹Peso (P); diámetro (D) y espesor (E).

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

Tabla 23. Características físicas¹ de la tortilla de harina de maíz nixtamalizada extrudida a las 2 h.

Tratamiento	P (g)	D (cm)	E (mm)
1	25.2 ² a ³	12.7 ² a ³ , b	1.7 ² b ³ , c, d
2	22.5 f, g, h, i, j	12.2 b	1.9 a
3	22.5 f, g, h, i, j	12.4 a, b	1.7 b, c
4	24.9 a, b	12.2 b	1.8 a
5	21.8 h, i, j	12.2 a, b	1.8 a
6	25.0 a, b	12.2 a, b	1.8 a, b
7	24.1 a, b, c, d	12.6 a, b	1.8 a
8	23.8 a, b, c, d, e, f	12.5 a, b	1.6 d, e
9	23.3 c, d, e, f, g, h	12.7 a, b	1.6 d, e
10	22.6 e, f, g, h, i, j	12.2 a, b	1.8 a
11	24.7 a, b, c	12.5 a, b	1.8 a
12	23.0 d, e, f, g, h, i	12.4 a, b	1.7 b, c, d
13	21.3 j	12.4 a, b	1.5 e, f
14	25.1 a, b	12.6 a, b	1.5 e, f
15	24.3 a, b, c, d	12.5 a, b	1.7 b, c, d
16	23.9 a, b, c, d, e, f	12.3 a, b	1.6 c, d
17	24.0 a, b, c, d, e, f	12.4 a, b	1.7 c, d
18	23.6 b, c, d, e, f, g	12.6 a, b	1.6 d, e
19	22.1 g, h, i, j	12.6 a, b	1.6 d, e
20	23.2 c, d, e, f, g, h	12.2 b	1.6 c, d
MASECA	21.6 i, j	12.8 a, b	1.4 g
NIXTAMAL	22.1 h, i, j	12.9 a	1.4 f, g
Promedio Global	23.4	12.5	1.7
DMS ⁴	1.5	0.7	0.1

¹ Peso (P); diámetro (D) y espesor (E).

² Valores promedio de diez repeticiones.

³ Valores con la misma letra no presentan diferencias estadísticamente significativas a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

⁴ DMS=Diferencia mínima significativa.

El valor máximo (1.9 mm) del espesor para las tortillas lo presentó el tratamiento 2 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.3\%$), sin diferencia significativa ($p<0.05$) con los tratamientos 4, 5, 6, 7, 10 y 11. El valor mínimo (1.5mm) fue para el tratamiento 13 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.16\%$), el cual no presentó diferencia significativa ($p<0.05$) con los tratamientos 8, 9, 14 y 18, así como con las de nixtamal, cuyo valor fue de 1.4 mm. Cabe mencionar que las elaboradas con maseca y nixtamal no presentaron diferencia significativa entre ellas, sin embargo la maseca presentó una diferencia significativa con los 20 tratamientos.

Los resultados obtenidos por Galicia (2005) y González (2006) fueron de tendencia contraria a los de esta investigación, ya que obtuvieron valores de peso y espesores de sus tortillas de maíz, elaboradas con harinas extrudidas, mayores que la comercial. Esto posiblemente a que utilizaron un método diferente para elaborar las tortillas. Resultados similares fueron los reportados por Enríquez-Ramos, 2004; Campas, 1997; Vázquez, 1995; Ramírez-Wong, 1989, los cuales emplearon el proceso tradicional de nixtamalización.

Firmeza

En la Tabla 24, se muestra la diferencia entre los tratamientos sobre la firmeza en la tortilla elaborada con harinas de maíz nixtamalizadas extrudidas a 2 h, 24 h y 48 h, a través del análisis de varianza, en donde el tratamiento afectó de manera muy significativa ($P<0.01$). En la Fig. 13, se presentan los valores promedio de 5 repeticiones de la fuerza máxima en tortilla elaborada a los diferentes tratamientos con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2 h, 24 h y 48 h de almacenamiento a temperatura ambiente (25°C). Los valores promedio para cada hora de almacenamiento fueron de 20.3 kg-f, 34.94 kg-f y 38.71 kg-f para 2 h, 24 h y 48 h, respectivamente. La DMS obtenida fue de 2.5, 3.7 y 5.7 para las 2h, 24h y 48h de almacenamiento, respectivamente.

Tabla 24. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la fuerza máxima¹ de la tortilla de harina de maíz nixtamalizado por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		2 H	24 H	48 H
Tratamiento	21	60.0**	109.6**	3.58**
Error	88			
Total	109			

¹Durante su almacenamiento a 25|°C por 2, 24 y 48 horas.

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).

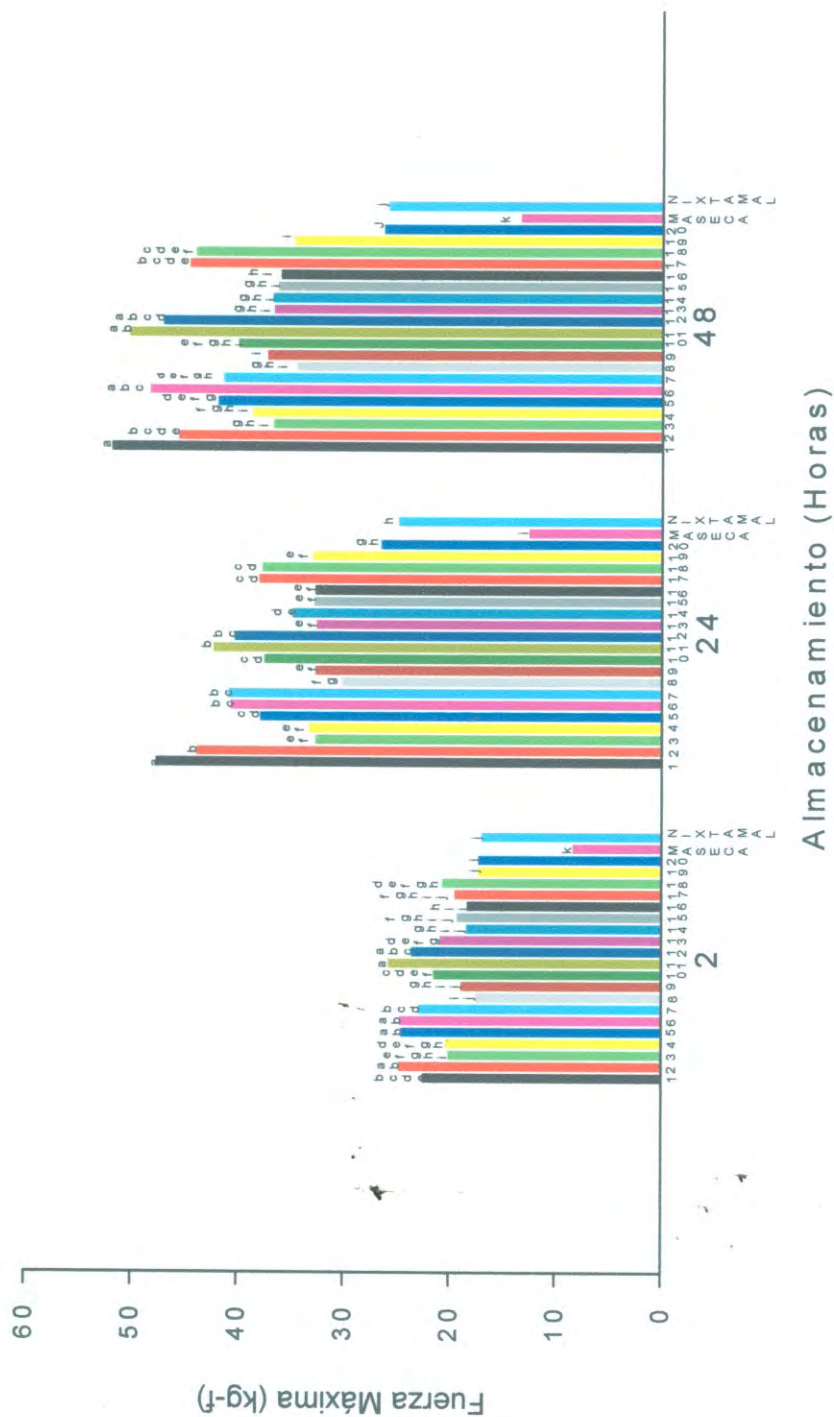


Figura 13. Fuerza máxima en tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2h, 24h y 48 h de almacenamiento a temperatura ambiente (25°C)

Para las 2 h de almacenamiento, el valor máximo (25.96 kg-f), correspondió al tratamiento 11 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=21.59\%$, $GX=0.5$), que no mostró diferencia significativa ($p<0.05$) con los tratamientos 2 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.3$), 5 ($T=110^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.7$) y 6 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.7\%$). El valor mínimo (17.45 kg-f), que es donde se presenta el mejor valor de firmeza, fue para el tratamiento 19 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5$), que no presentó una diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) con los tratamientos 8 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=35\%$, $GX=0.7\%$), 9 ($T=103.187^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$), 14 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.84\%$), 15, 16, 17 y 20, cuyas condiciones son las mismas que el 19. Cabe mencionar que estos tratamientos no presentaron diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) con el valor (17.19 kg-f) de las tortillas elaboradas con la masa de nixtamal. Sin embargo, si se presentó una diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) de éstos con las de maseca (8.51kg-f).

En las 24 h de almacenamiento, el valor máximo (47.88 kg-f) correspondió al tratamiento 1 ($T=110^{\circ}\text{C}$, $H=25\%$, $GX=0.3\%$), que presentó una diferencia significativa ($p<0.05$) con el resto de los tratamientos. El valor mínimo (26.63 kg-f), que es donde se presenta el mejor valor de firmeza, fue para el tratamiento 20 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$), que no presentó una diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) con el tratamiento 8 ($T=130^{\circ}\text{C}$, $H=35\%$, $GX=0.7\%$), así como con las de nixtamal. La tortillas elaboradas con maseca presentaron un valor de 12.75 kg-f, con una diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) a todos los tratamientos y a las de nixtamal.

Para las 48 h de almacenamiento, el tratamiento 1 presentó el valor máximo (51.97 Kgf), tal como en las 24 h, sin diferencia significativa ($p<0.05$) con los tratamientos 12 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=38.41\%$, $GX=0.16\%$), 11 y 6, cuyas condiciones fueron arriba mencionadas. El valor mínimo (26.4 kg-f) fue similar al de las 24 h, correspondiendo al mismo tratamiento (20), quien presentó diferencia significativa con el resto de los tratamientos, sin embargo no con las de nixtamal. Así mismo, las de maseca mostraron un valor similar (13.53 kg-f) con diferencia

significativa ($p < 0.05$) a los 20 tratamientos y a las de nixtamal. Las tortillas a las 48 h presentaban un inicio de descomposición así como un ataque de microorganismos debido a la alta humedad, resultado de la condensación que se presenta dentro de la bolsa de polietileno.

Los valores mínimos de la firmeza en las tortillas a los diferentes tratamientos, durante su almacenamiento, correspondieron a concentraciones altas de goma xantana, es decir de 0.5 a 0.84 %, reteniendo la humedad presente en la tortilla, y mejorando las características texturales de la misma, tal como lo menciona Arámbula *et al.* (1999), que obtuvo mejores resultados al utilizar la goma xantana con respecto a otras, tales como la guar, CMC y goma arábica, todas a la concentración de 0.5%.

Tanto las tortillas elaboradas con harinas extrudidas, nixtamal y de maseca mostraron una tendencia similar de incremento en la fuerza de rompimiento (aumento en la dureza) durante su almacenamiento, mostrándose que a las 24 h fue del 71.6 % y a las 48 h del 88.8 % como promedio. Tal como lo señalan diferentes autores (Fernández *et al.*, 1999; Vásquez, 1995; Gracia y Silva, 1992; Ramírez-Wong, 1989), y por los resultados obtenidos en el estudio realizado, los cambios más significativos en cuanto la textura durante el almacenamiento suceden durante las primeras 24 h (25 °C). Arámbula *et al.* (2002), menciona que la tortilla es altamente susceptible a la pérdida de humedad, debido a su alto contenido (48 a 50 % peso/peso). Por otra lado, Fernández *et al.* (1999), menciona que la retención de algunos cristales de almidón después del horneado de la tortilla funcionan como núcleos que facilitan la rápida asociación del almidón, lo que produce cambios estructurales durante las 24 h iniciales después de la cocción, lo que facilita una rápida retrogradación o incremento de la textura de este producto.

Los resultados obtenidos en las tortillas de harina de maíz nixtamalizada por extrusión son similares a los reportados por Galicia (2005) y de González

(2006) a las 2h de almacenamiento, pero a las 24 h y 48 h el valor obtenido en el presente estudio fueron menores que los reportados por estos mismos autores, debido a que no utilizaron gomas en su elaboración. Así mismo, al medir la firmeza en tortillas nixtamalizadas por el proceso tradicional Enríquez-Ramos (2004) y Vázquez (1995) obtuvieron valores mayores, debido a que utilizaron tortillas de un espesor mayor que la de nuestra investigación. Sin embargo, la tendencia al aumento durante el almacenamiento fue similar.

Rollabilidad

En la Tabla 25, se muestra la diferencia entre los tratamientos sobre la rollabilidad en la tortilla elaborada con harinas de maíz nixtamalizadas extrudidas a 2 h, 24 h y 48 h, a través del análisis de varianza, en donde el tratamiento afectó de manera muy significativa ($P < 0.01$). En la Fig. 14, se presentan los valores promedio de 15 repeticiones de la rollabilidad en tortilla elaborada a los diferentes tratamientos con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2 h, 24 h y 48 de almacenamiento a temperatura ambiente (25°C). Los valores promedio para cada hora de almacenamiento fueron de 4.5, 2.5 y 1.9 para 2 h, 24 h, y 48 h, respectivamente. La DMS obtenida fue de 1, 1.2, y 1 para las 2 h, 24 h, y 48 h de almacenamiento, respectivamente.

Para las 2 h de almacenamiento, el valor máximo (5), que es donde se presenta el mejor valor de rollabilidad, correspondió al tratamiento 19 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5$), que no mostró diferencia significativa ($p < 0.05$) con la de maseca, nixtamal y el resto de los tratamientos, excepto con el 11 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=21.59\%$, $GX=0.5$) y 12 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=38.41\%$, $GX=0.5\%$). El valor mínimo (3.6) fue para el tratamiento 12.

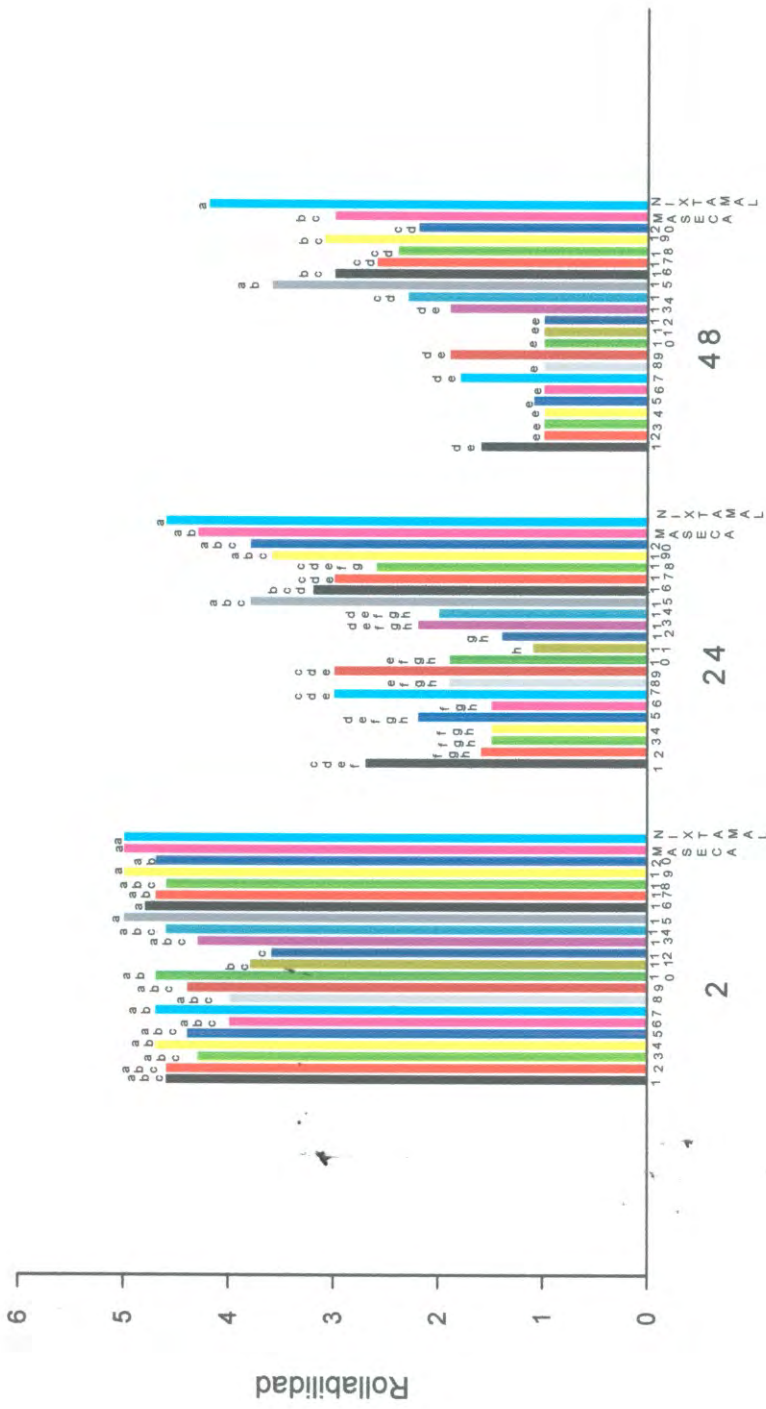
A las 24 h de almacenamiento, los tratamientos 15, 19 y 20, cuyas condiciones corresponden a $T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$ y $GX=0.5\%$ presentaron los valores

Tabla 25. Análisis de varianza, valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la rollabilidad¹ de las tortillas de harinas de maíz nixtamalizado por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		2 H	24 H	48 H
Tratamiento	21	3.5**	16.29**	24.8**
Error	308			
Total	329			

¹Durante su almacenamiento a 25°C por 2, 24 y 48 horas.

**= Muy Significativo a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$).



Almacenamiento (Horas)

Figura 14. Rollabilidad en tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2h, 24h y 48h de almacenamiento a temperatura ambiente (25°C).

mayores, que es donde se presenta el mejor valor de rollabilidad (3.8, 3.8, y 3.6, respectivamente), sin diferencia significativa ($p < 0.05$) con los de maseca (4.3) y nixtamales (4.6). El valor mínimo (1.1) fue para el tratamiento 11 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=21.59\%$, $GX=0.5\%$), que no presentó una diferencia estadística con los tratamientos 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 14 y 15.

Para las 48 h de almacenamiento, el tratamiento 15 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5$) presentó el valor máximo (3.6), que es donde se presenta el mejor valor de rollabilidad, sin mostrar diferencia significativa ($p < 0.05$) con las de nixtamal (4.2). A su vez, dicho tratamiento no presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) con las de maseca y los tratamientos 16 (3) y 19 (3.1), cuyas condiciones son iguales al tratamiento 15. Sin embargo, las de nixtamal mostraron un valor mayor con diferencia significativa a las de maseca, debido a que el uso del grano entero da mejores propiedades de rollabilidad, esto puede ser atribuido a la presencia de gomas presentes en el pericarpio (Martínez-Bustos *et al.*, 2000). El valor mínimo (1) correspondió al tratamiento 6 ($T=130^{\circ}$, $H=25\%$, $GX=0.7$), sin diferencia significativa con los tratamientos del 1 al 13.

Como se observa los valores *máximos* obtenidos de rollabilidad durante el almacenamiento correspondió a la concentración de goma de 0.5%, que ofreció mayor flexibilidad a las tortillas al igual que en el estudio de Arámbula *et al.* (1999) al usar la misma concentración y la misma goma (xantana). Los valores obtenidos de rollabilidad muestran valores similares a los reportados por la literatura de harinas extrudidas sin gomas durante su almacenamiento (Galicia, 2005; González, 2006; Flores-Farias *et al.*, 2000; Arámbula *et al.*, 1998; Martínez-Flores *et al.*, 1998; Bedolla y Rooney, 1984).

Correlaciones entre las Diferentes Determinaciones

Con el propósito de conocer si existe alguna relación entre las determinaciones realizadas al extrudido, a la harina nixtamalizada extrudida, a la masa y la tortilla elaborada con dicha harina se llevaron a cabo correlaciones simples (r). Se consideró una correlación débil si $|r| < 0.5$, moderada si $0.5 \leq |r| \leq 0.75$ y fuerte si $|r| > 0.75$ (Ramirez-Wong *et al.* 1994). En la Tabla 26 se muestran los resultados y se puede observar que se encontraron 41 correlaciones significativas a un nivel de $p < 0.05$, de las cuales 34 fueron débiles, 6 moderadas y 1 fuerte; también se encontraron 65 correlaciones significativas a un nivel de $p < 0.01$, de las cuales 54 fueron moderadas y 11 fuertes.

Se presentaron correlaciones positivas moderadas y fuertes de la rollabilidad a las 24 h y 48 h con la capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS) de la harina y la humedad de la masa (HUMA), mostrando éstas una correlación positiva y fuerte entre sí. Indicando que la concentración de goma incorporada en los tratamientos afectó en la retención de agua y funcionalidad del producto, tal como lo atribuyen Arámbula *et al.* (1999) y Yau *et al.* (1994).

También se tuvieron correlaciones simples con los módulos de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') con las determinaciones realizadas en la harina, masa y tortilla, tal como se muestra en la Tabla 27. Se observa que G' y G'' presentaron correlaciones negativas débiles y moderadas con el IAA, CAAS y HUMA y positivas con la fuerza máxima a las 2, 24, y 48 h; y correlaciones negativas moderadas con la rollabilidad a las 2, 24 y 48 h, indicando que el agua absorbida por la harina puede funcionar como un lubricante (Rodríguez, 2003; San Martín-Martínez *et al.*, 2003).

Tabla 26. Correlaciones simples (r) entre determinaciones¹ realizadas a las harinas, masas y tortillas de maíz nixtamalizado por extrusión.

Determinación	R48	R24	R2	Fm48	Fm24	Fm2	ET	DT	PT	Tanδ	G'	G''	HUMA	CAAS	Tf	μ	Cb	CL	IMS	IAA	ITP	MF	M100	M80	M60	M40	HH	EE	
IEE				0.554**	0.516**	0.527**	0.505*	-0.580**												-0.613**								1.00	
HH	-0.641**																												1.00
M40	-0.599**	-0.663**																											1.00
M60		0.456*																											1.00
M100	0.512*	0.625**	0.445*																										1.00
ITP																													1.00
IAA																													1.00
IMS																													1.00
CL																													1.00
Cb																													1.00
Tf																													1.00
CAAS																													1.00
HUMA																													1.00
G'																													1.00
G''																													1.00
Tanδ																													1.00
PT																													1.00
DT																													1.00
ET																													1.00
Fm2																													1.00
Fm24																													1.00
Fm48																													1.00
R2																													1.00
R24																													1.00
R48																													1.00

* Significativas a un nivel de p= 0.05 (p<0.05).

** Significativas a un nivel de p= 0.01 (p<0.01).

¹ IEE= índice de expansión de extrudidos; HH= humedad de harina; M40= distribución de tamaño de partícula en malla #40; M60= distribución de tamaño de partícula en malla #60; M80= distribución de tamaño de partícula en malla #80; M100= distribución de tamaño de partícula en malla #100; MF= índice de expansión de partícula; CL= capacidad de absorción de agua; IMS= índice de material soluble; CAAS= capacidad de absorción de agua subjetiva; HUMA = humedad de masa; Tf= temperatura final de gelatinización; G' = módulo de almacenamiento; G'' = módulo de pérdida; Tanδ= tangente del ángulo de fase; PT= peso tortilla; DT= diámetro tortilla; ET= espesor tortilla; Fm2= fuerza máxima a las 2 h; Fm24 = fuerza máxima a las 24 h; Fm48 = fuerza máxima a las 48 h; R2 =rollabilidad a las 2 h; R24=rollabilidad a las 24 h; R48=rollabilidad a las 48 h.

Tabla 27. Correlaciones simples (r) entre los módulos de almacenamiento y de pérdida de la masa con algunas determinaciones realizadas en harina de maíz extrudida, su masa y tortilla.

Determinaciones	Módulo de Almacenamiento (G')	Módulo de Pérdida (G'')
Índice de Absorción de agua	-0.465*	-0.550**
Capacidad de absorción de agua subjetiva	-0.574**	-0.444*
Humedad de masa	-0.584**	-0.463*
Fuerza máxima 2H	0.607**	0.601**
Fuerza máxima 24H	0.490*	0.468*
Fuerza máxima 48h	0.596**	0.589**
Rollabilidad 2H	-0.586**	-0.621**
Rollabilidad 24H	-0.668**	-0.571**
Rollabilidad 48H	-0.672**	-0.547**

*Significativas a un nivel de $p=0.05$ ($p<0.05$).

**Significativas a un nivel de $p=0.01$ ($p<0.01$)

Modelos de Predicción para las Variables Respuesta

Los valores experimentales de las variables respuesta (índice de absorción de agua IAA, módulo de almacenamiento G' , módulo de pérdida G'' , tangente del ángulo de fase $\tan\delta$ y fuerza máxima F_{max}) obtenidos a las diferentes combinaciones de variables del proceso de extrusión (temperatura de extrusión T , humedad de la harina de maíz integral acondicionada H y goma xantana GX), son presentados en las Tablas 11,21 y Fig. 13, respectivamente.

Índice de absorción de agua

Los valores experimentales del índice de absorción de agua (IAA) de las harinas de maíz extrudidas variaron de 2.2 a 3.6 g de gel/g de materia seca (Tabla 11). El análisis de varianza mostró que el IAA dependió del término lineal de la humedad de acondicionamiento (H , $P \leq 0.0024$), término cuadrático de H (H^2 , $p \leq 0.10$) y término combinado de humedad con goma xantana (HGX , $p \leq 0.1009$).

El modelo de predicción para el IAA de las harinas extrudidas de maíz fue:

$$Y_{IAA} = - 4.37 + 0.583H - 0.01 H^2 + 0.137 (H)(GX) \quad (12)$$

El modelo de regresión explicó el 71% del total de la variación ($p < 0.0019$) en el IAA de harinas extrudidas (Tabla 28). La Fig. 15 muestra el efecto de IAA de harinas extrudidas como una función de T , H , GX , observándose que al aumentar la humedad de acondicionamiento en la harina aumenta su índice de absorción de agua, así como al aumentar la concentración de goma xantana a altas humedades. Vargas-López (1987) menciona que grits extrudidos de maíz-sorgo y almidón de maíz exhiben un máximo IAA a altas temperaturas y altos contenidos

Tabla 28. Coeficientes de regresión y análisis de varianza de los modelos polinomiales de segundo orden mostrando la relación entre las variables respuesta y variables proceso.

Coefficientes	Índice de Absorción de agua (Y_{IAA})	Módulo de almacenamiento (Y_G')	Módulo de Pérdida (Y_G'')	Tangente del ángulo de fase ($Y_{Tan\phi}$)	Fuerza Máxima (Y_{Fmax})
Intercepto	-4.37	2821540.00	242935.00	-1.50	100.00
Lineal					
β_1	-0.0063 ^{NS}	-23496.63 ^{NS}	-69.54 ^{NS}	0.02 ^{NS}	0.65 ^{NS}
β_2	0.583 ^{***}	-79954.76 ^{NS}	-12716.92 ^{NS}	0.02 ^{NS}	-3.35 ^{***}
β_3	-4.08 ^{NS}	-153138.00*	-23170.33 ^{NS}	-0.000006 ^{NS}	48.29 ^{NS}
Cuadrático					
β_{11}		80.97 ^{NS}		-0.000073 ^{**}	0.0061 ^{NS}
β_{22}	-0.01 ^{***}	1040.44 ^{***}	224.32 ^{***}	-0.00011 ^{NS}	0.088 ^{***}
β_{33}		221592.00 ^{NS}		-0.293 ^{***}	10.54 ^{NS}
Interacciones					
β_{12}		163.33 ^{NS}		-0.00018*	-0.018*
β_{13}			501.03 ^{NS}	0.0026 ^{NS}	-0.497*
β_{23}	0.137*	-4416.75 ^{NS}	-1521.57 ^{NS}		
R^2	0.71	0.70	0.70	0.70	0.82
$P \leq$	0.0019	0.0371	0.007	0.0449	0.0028

*Nivel de significancia a $p \leq 0.10$

**Nivel de significancia a $p \leq 0.05$

*** Nivel de significancia a $p \leq 0.01$

NS No significativo a $p \geq 0.10$

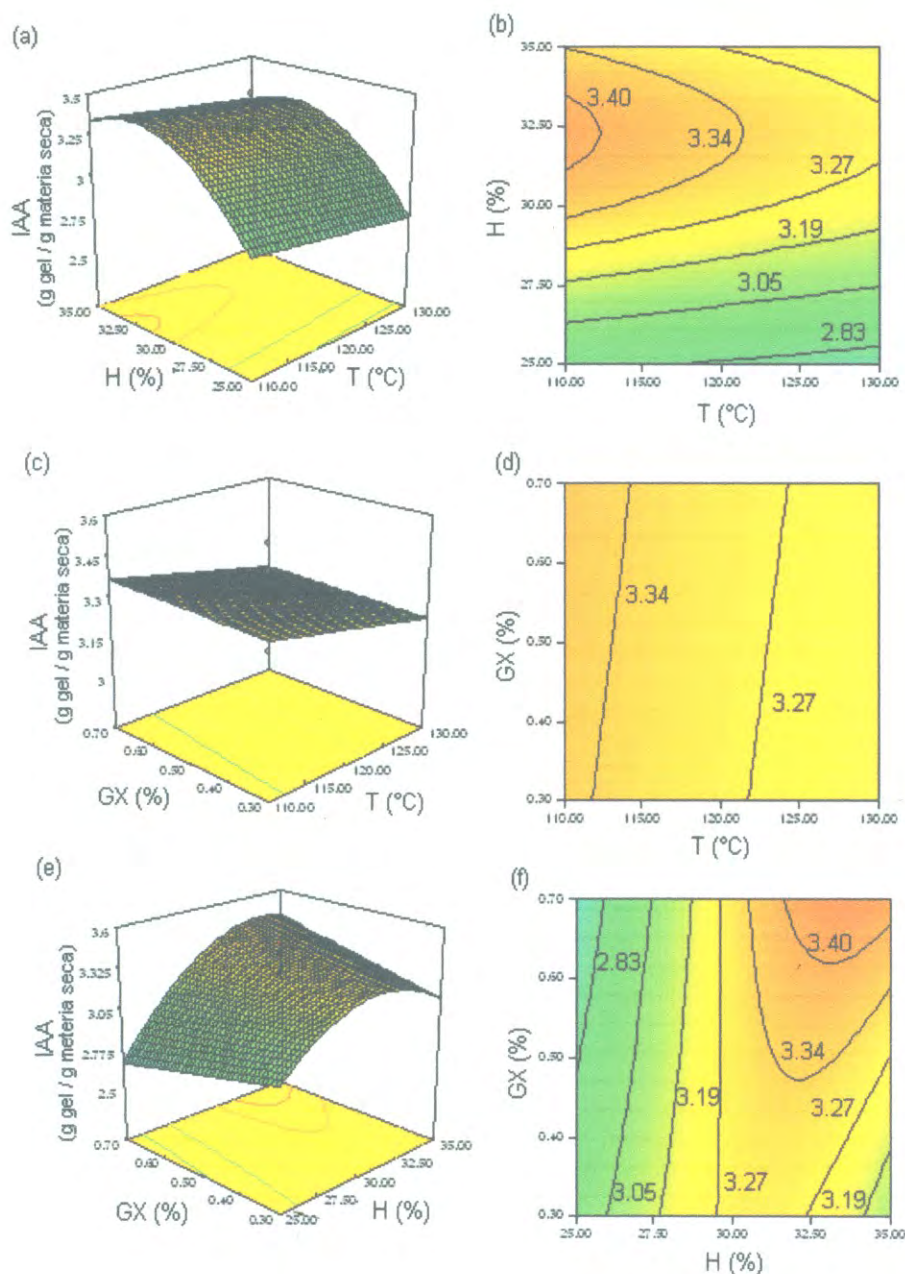


Figura 15. Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre el índice de absorción de agua (IAA) en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre el IAA; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p) y T sobre el IAA; (e y f) Efecto de GX y H sobre el IAA.

de humedad. Los valores máximo (3.40 g gel/g materia seca) y mínimo (2.83 g gel/g materia seca) se observaron a $T=110-114^{\circ}\text{C}/H=30.12-33.14\%/GX=0.62-0.70\%$ (Figs. 15a, 15b, 15e, y 15f) y $T=118-130^{\circ}\text{C}/H=25.0-25.73\%/GX=0.49-0.7\%$ (Figs. 15a, 15b, 15e, y 15f).

Módulo de almacenamiento

Los resultados experimentales del módulo de almacenamiento (G') de las masas de harinas de maíz extrudidas mostraron un rango de valores de 176667-302000 Pa (Tabla 21). El análisis de varianza presentó que el G' dependió del término lineal de la goma xantana (GX , $p \leq 0.0792$) y término cuadrático de humedad (H^2 , $p \leq 0.0022$).

El modelo de predicción para el G' de las masas de harinas extrudidas de maíz fue:

$$Y_{G'} = 2821540 - 153138GX + 1040.44H^2 \quad (13)$$

El modelo de regresión explicó el 70% del total de la variación ($p < 0.0371$) en el G' de harinas extrudidas (Tabla 28). La Fig. 16 muestra el efecto del G' de masas de harinas extrudidas como una función de T , H , GX , observándose que a cualquier valor de humedad a partir aproximadamente del punto central (30%), el G' se incrementa, debido a su efecto cuadrático, y que al aumentar la concentración de goma disminuye el valor de G' , por su efecto lineal. Los valores máximo (238831 Pa) y mínimo (204629 Pa) se observaron a $T=124.12-130^{\circ}\text{C}/H=3.34-34.91\%/GX=0.30-0.34\%$ (Figs. 16a, 16b, 17c, y 17d) y $T=111.3-117.36^{\circ}\text{C}/H=29.66-31.37\%/GX=0.49-0.70\%$ (Figs. 16a, 16b, 17c, y 17d), respectivamente.

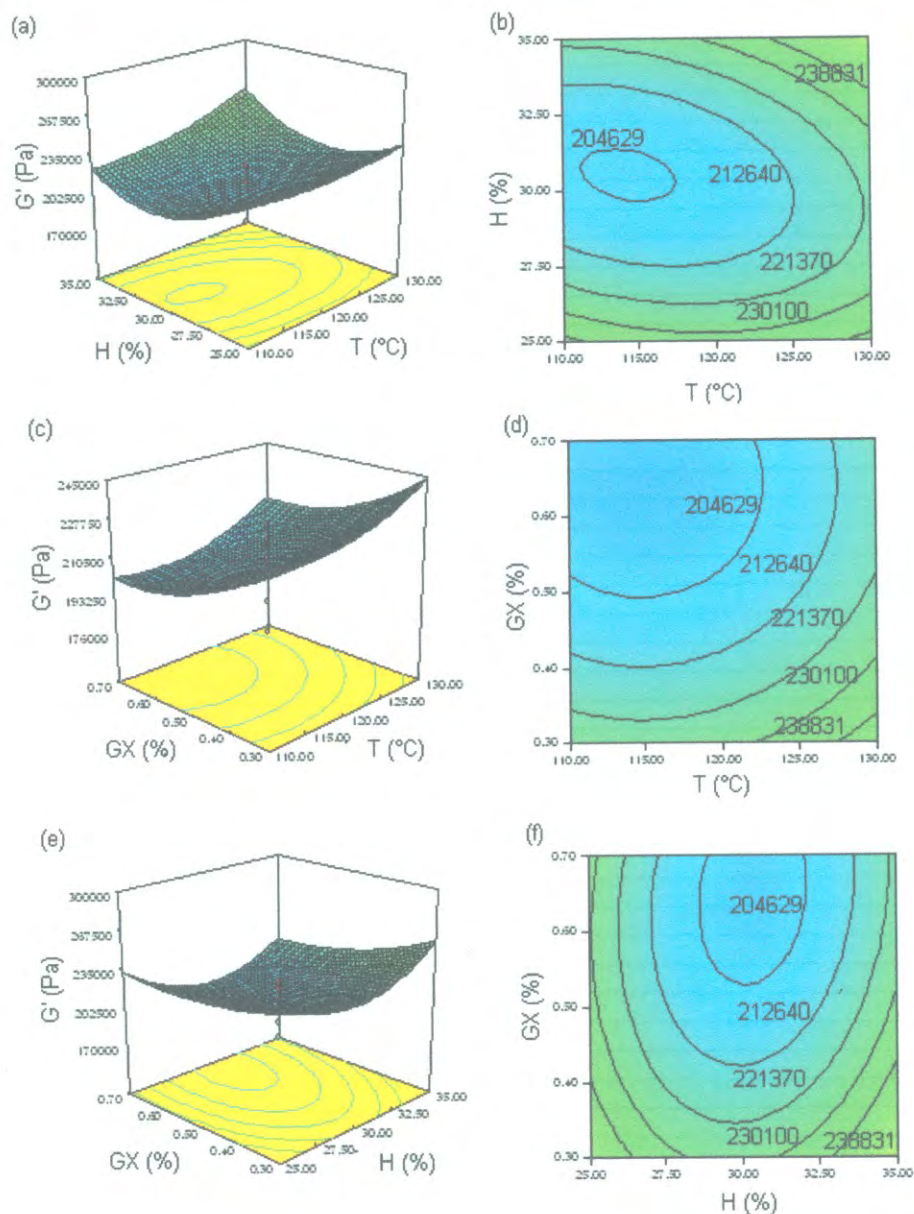


Figura 16. Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre el módulo de almacenamiento (G') en masas de harinas de maíz extrudido. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H , % p/p) y temperatura de extrusión (T , °C) sobre el G' ; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX , % p/p) y T sobre el IAA; (e y f) Efecto de GX y H sobre el G' .

Módulo de pérdida

Los valores obtenidos del módulo de pérdida (G'') de las masas de harinas extrudidas anduvieron en un rango de 45714-72182 Pa (Tabla 21). El análisis de varianza mostró que el G'' dependió del término cuadrático de humedad (H^2 , $p \leq 0.0003$).

El modelo de predicción para el G'' de las masas de harinas extrudidas de maíz fue:

$$Y_{G''} = 242935 + 224.32H^2 \quad (14)$$

El modelo de regresión explicó el 70% del total de la variación ($p < 0.007$) en el G'' de masas de harinas extrudidas (Tabla 28). La Fig. 17 muestra el efecto del G'' de masas harinas extrudidas como una función de T , H , GX , observándose que para cualquier valor de humedad a partir del punto central (30%), el G'' se incrementa, debido al efecto cuadrático. Los valores máximo (56582.5 Pa) y mínimo (49354 Pa) se observaron a $T=122.34-130^\circ\text{C}/H=34.35-35\%/GX=0.30-0.46\%$ (Figs. 17a, 17b, 17e, y 17f) y $T=110.113^\circ\text{C}/H=28.68-31.53\%/GX=0.46-0.70\%$ (Figs. 17a, 17b, 17c, y 17d), respectivamente.

Tangente del ángulo de fase

Los valores obtenidos de la tangente del ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$) de las masas de harinas extrudidas anduvieron en el rango de 0.19-0.26 (Tabla 19). El análisis de varianza mostró que la $\text{Tan } \delta$ dependió de los términos cuadráticos de temperatura (T^2 , $p \leq 0.044$), y goma xantana (GX^2 , $p \leq 0.0039$) y de la interacción temperatura- humedad (TH , $p \leq 0.0572$).

El modelo de predicción para la $\text{Tan } \delta$ de las masas de harinas extrudidas de maíz fue:

$$Y_{\text{Tan } \delta} = -1.5 + 0.021T - 0.000073(T)^2 - 0.293(GX)^2 - 0.00018(T)(H) \quad (15)$$

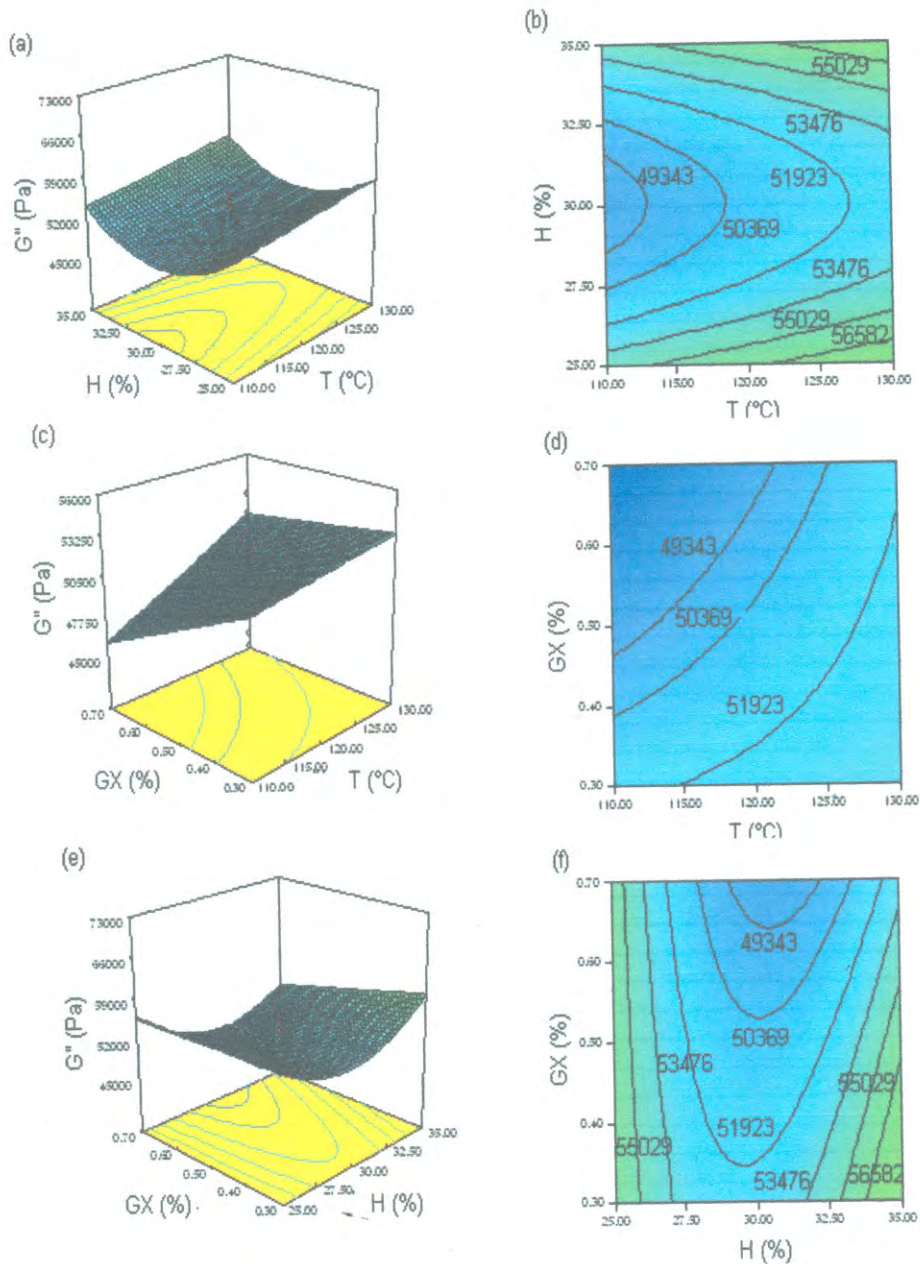


Figura 17. Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre el módulo de pérdida (G'') en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H , % p/p) y temperatura de extrusión (T , °C) sobre el G'' ; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX , % p/p) y T sobre el G'' ; (e y f) Efecto de GX y H sobre el G'' .

El modelo de regresión explicó el 70% del total de la variación ($p < 0.0449$) en la $Tan \delta$ de masas de harinas extrudidas (Tabla 28). La Fig. 18 muestra el efecto de la $Tan \delta$ de masas de harinas extrudidas como una función de T, H, GX, observándose que a cualquier concentración de goma xantana a partir aproximadamente del punto central (0.5%) la $Tan \delta$ disminuye, debido a su efecto cuadrático. Los valores máximo (0.247) y mínimo (0.223) se presentaron a $T=119.5-121.8^{\circ}C/H=30.4-35\%/GX=0.52-0.56\%$ (Figs. 18a, 18b, 18c, y 18d) y $T=127.5-130^{\circ}C/H=25-25.3\%/GX=0.3-0.33\%$ (Figs. 18a, 18b, 18c, y 18d), respectivamente.

Fuerza máxima

Los valores obtenidos de la fuerza máxima de las tortillas de harinas extrudidas anduvieron en el rango de 17.45 – 25.96 (Fig. 13). El análisis de varianza mostró que la F_{max} dependió del término lineal de humedad (H, $p \leq 0.0046$), cuadrado de humedad (H^2 , $p \leq 0.0002$) y de las combinaciones de temperatura-humedad (TH, $p \leq 0.10$) y temperatura-goma [(T)(GX), $p \leq 0.0854$].

El modelo de predicción para la F_{max} de las tortillas de harinas extrudidas de maíz fue:

$$Y_{F_{max}} = 100 - 3.35H - 0.088H^2 - 0.018(T)(H) - 0.497(T)(GX) \quad (16)$$

El modelo de regresión explicó el 82% del total de la variación ($p < 0.0028$) de la F_{max} de tortillas de harinas extrudidas (Tabla 28). La Fig. 19 muestra el efecto de la F_{max} de tortillas de harinas extrudidas como una función de T, H, GX, observándose que a cualquier valor de humedad de acondicionamiento

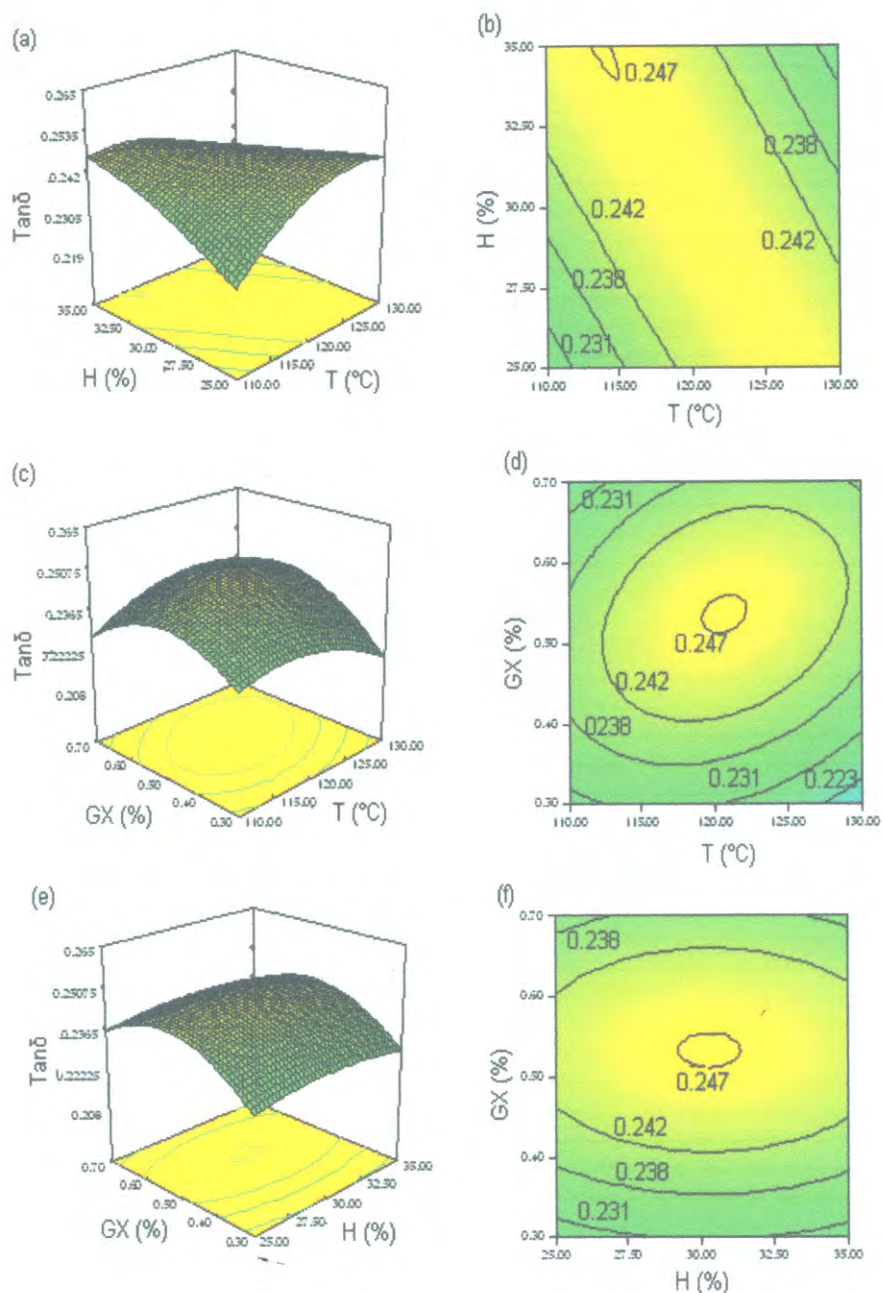


Figura 18. Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre la tangente del ángulo fase ($\tan\delta$) en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H, % p/p) y temperatura de extrusión (T, °C) sobre la $\tan\delta$; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX, % p/p) y T sobre la $\tan\delta$; (e y f) Efecto de GX y H sobre la $\tan\delta$.

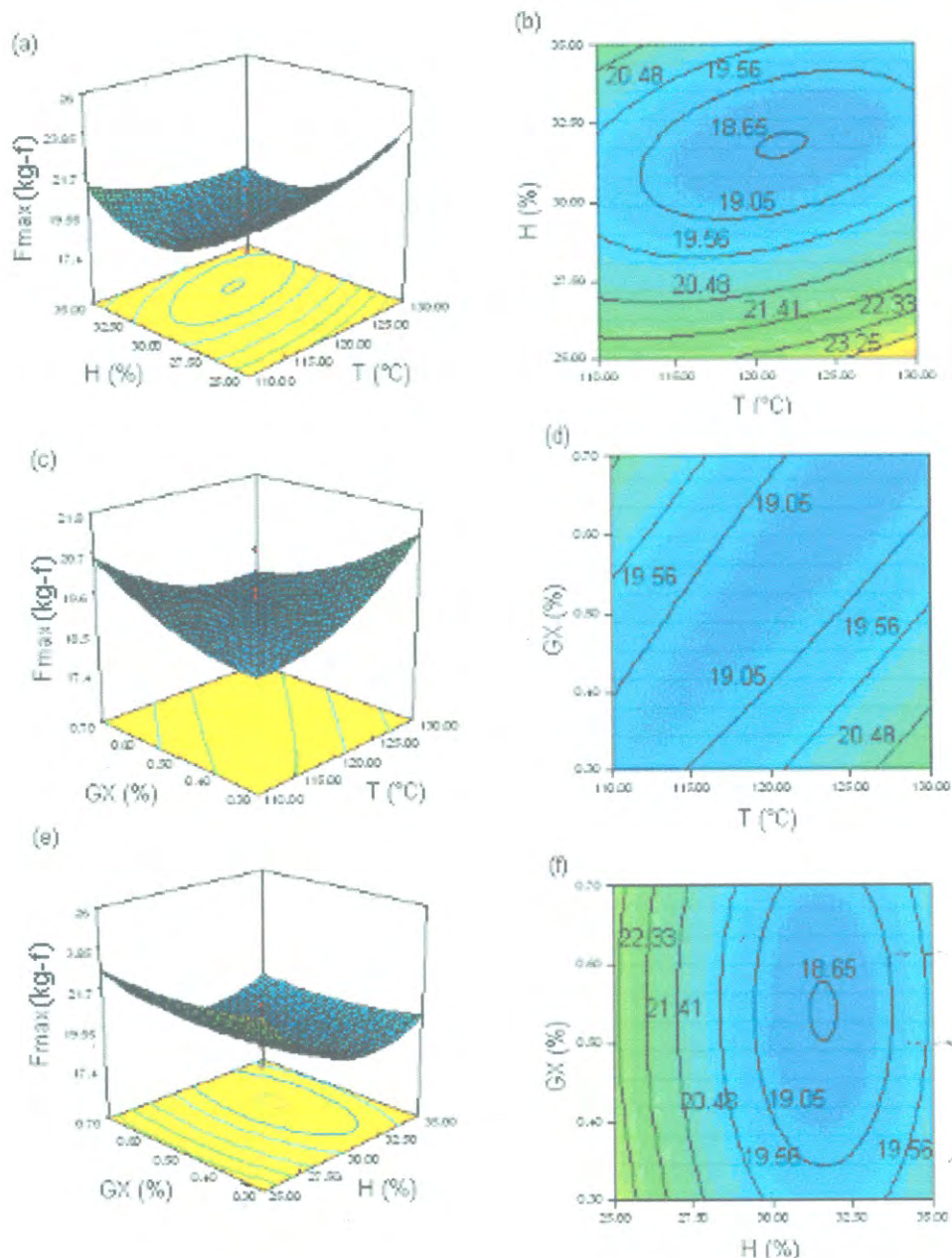


Figura 19. Gráficas de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre la fuerza máxima (F_{max}) en harinas de maíz extrudida. (a y b) Efecto de la humedad de acondicionamiento (H , % p/p) y temperatura de extrusión (T , °C) sobre la F_{max} ; (c y d) Efecto de la goma xantana (GX , % p/p) y T sobre la F_{max} ; (e y f) Efecto de GX y H sobre la F_{max} .

a partir aproximadamente del punto central, la fuerza máxima se incrementa, debido a su efecto cuadrático. Los valores máximo (23.25) y mínimo (18.65) se presentaron a $T=125.6 - 130^{\circ}\text{C}/H=25-25.8\%/GX=0.3-0.7\%$ (Figs. 19a, 19b, 19e, y 19f) y $T=120.11-123.2^{\circ}\text{C}/H=31.4-32.1\%/GX= 0.50-0.58\%$ (Figs. 19a, 19b, 19e, y 19f), respectivamente.

Optimización del Proceso de Extrusión

Las Figs. 15 (b,d,f), 16 (b,d,f), 17 (b,d,f), 18 (b,d,f), y 19 (b,d,f) presentan el efecto de las variables del proceso de extrusión (T, H, GX) sobre IAA en harina; G' , G'' y $\text{Tan } \delta$ en masa y F_{max} en tortilla a partir de harina de maíz nixtamalizado por extrusión, respectivamente. La superposición de estos gráficos de contorno fue utilizada para obtener la Fig. 20 que fue utilizada para determinar las mejores combinaciones de las variables proceso de extrusión. Los puntos centrales de las regiones de optimización en la Fig. 20 (a-c) corresponden a los valores de las variables proceso de $T=118.07^{\circ}\text{C}/H=30.82\%$ (p/p), $GX=0.63\%$ (p/p) / $T=119.49^{\circ}\text{C}$ y $GX=0.60\%$ (p/p) / $H=31.02\%$, respectivamente. La combinación óptima de las condiciones de operación del extrusor de tornillo simple fueron derivadas del promedio de estos valores: $T=118.78^{\circ}\text{C}$ / $H= 30.92\%$ (p/p) / $GX = 0.61\%$ (p/p).

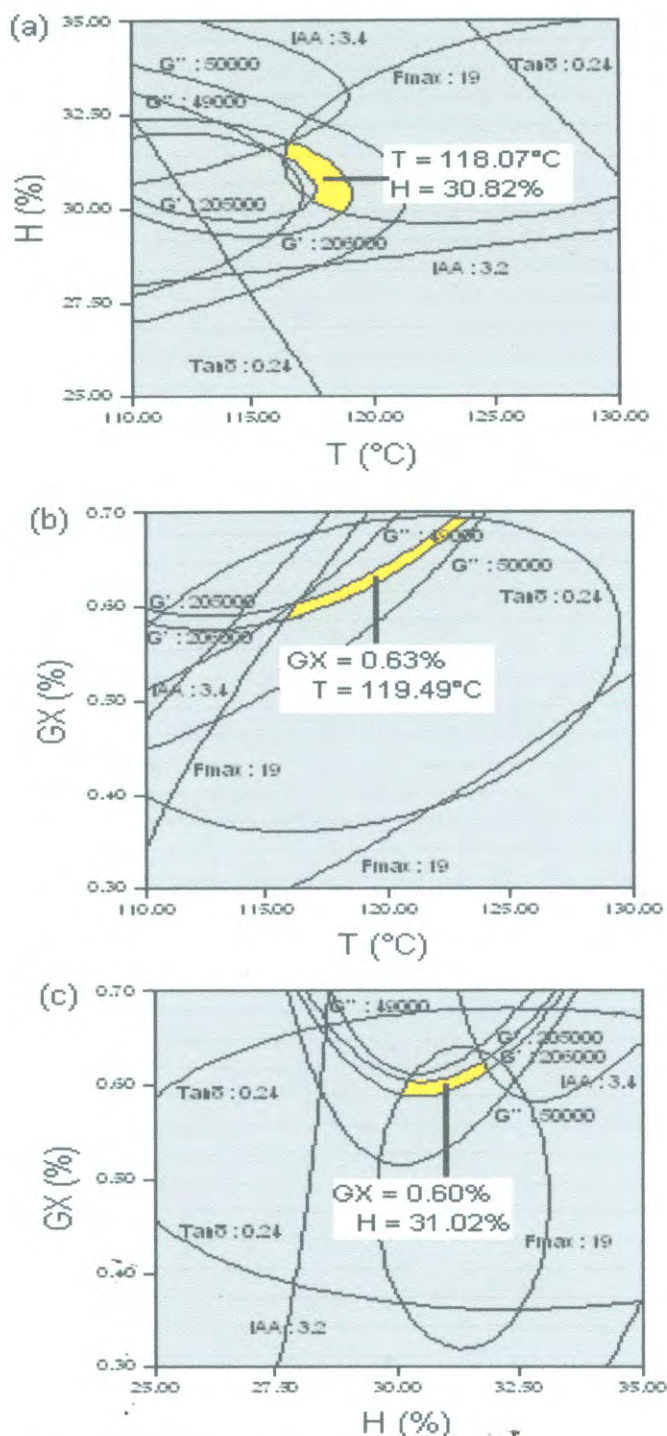


Figura 20. Regiones de mejores combinaciones de las variables proceso para la producción óptima de harina de maíz extrudida con un extrusor de tornillo simple.

CONCLUSIONES

La concentración de goma xantana, humedad de acondicionamiento de la harina y temperatura del extrusor afectaron significativamente a las diferentes determinaciones realizadas a la HMNE, masa y tortilla.

Los resultados obtenidos en las harinas extrudidas muestran que IAA, CAAS y μ_{\max} fueron afectados por la concentración de goma xantana, tal como se observa en los tratamientos 13 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.16\%$) y 14 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.84\%$), por las características propias de las gomas, ya que al aumentar la concentración aumentan dichos valores. Sin embargo, estos valores fueron menores que los presentados por la harina comercial, probablemente debido a su menor tamaño de partícula con respecto a las harinas de maíz nixtamalizadas extrudidas, ya que ésta se utilizó como harina integral en la investigación. La harina comercial como las nixtamalizadas por extrusión cumplieron con las condiciones de granulometría de la Norma Mexicana (NMX-F-046-S-1980), que establece que el 75% de la harina debe pasar a través de una malla de número 60.

Las masas de varios tratamientos de harinas extrudidas mostraron similitud con la masa comercial en sus propiedades viscoelásticas (G' , G'' y $\text{Tan}\delta$) y fueron diferentes a los de la masa de harina comercial, excepto la masa del tratamiento 19 ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$) que presentó un valor igual de $\text{Tan}\delta$. Y que G' y G'' de las masas de harinas extrudidas están relacionados con IAA, CAAS, HUMA y propiedades texturales en la tortilla durante su almacenamiento, ya que masas que presentaron un menor valor de estos módulos mostraron altos IAA, CAAS y HUMA con menor fuerza máxima y una mayor rollabilidad. Se observó que la masa comercial, masa de harina comercial y masas de harinas extrudidas presentaron una mayor parte elástica que viscosa, ya que tuvieron un valor bajo de $\text{Tan}\delta$.

La firmeza y flexibilidad de las tortillas a partir de harinas extrudidas fueron similares a las elaboradas con masa comercial, principalmente las del punto central de la matriz de diseño ($T=120^{\circ}\text{C}$, $H=30\%$, $GX=0.5\%$) en estado fresco y durante su almacenamiento hasta las 48 h, debido a que son elaboradas con grano entero. Las tortillas elaboradas con harina comercial presentaron durante todo su almacenamiento menor dureza que las extrudidas y de masa comercial, sin embargo la flexibilidad fue similar a la de masa comercial y a las extrudidas en las condiciones del punto central.

En el efecto de las variables respuesta IAA, G' , G'' y F_{max} como una función de T , H y GX , se observó que el coeficiente cuadrático de la humedad de los modelos de predicción fue muy significativo ($p \leq 0.01$), y que a cualquier valor de humedad, a partir de aproximadamente del punto central, estas variables respuesta se incrementaron, debido a su efecto cuadrático. Y en el efecto de la $Tan \delta$ se presentó que el coeficiente cuadrático de goma xantana fue muy significativo ($p \leq 0.01$), y que a cualquier valor, a partir de aproximadamente del punto central, la $Tan \delta$ disminuyó, debido a su efecto cuadrático. Y La combinación óptima de las condiciones de operación del extrusor de tornillo simple fueron: $T=118.78^{\circ}\text{C}$ / $H= 30.92\%$ (p/p) / $GX = 0.61\%$ (p/p).

El proceso de extrusión con goma xantana muestra ser una alternativa para la producción de tortillas de harina de maíz nixtamalizada con características de firmeza y de flexibilidad aceptables al consumidor.

RECOMENDACIONES

Desarrollar una investigación similar, pero evaluando los efectos de la harina de maíz crudo sin las partículas gruesas (malla #40) y con la combinación de otra goma como la Carboximetilcelulosa (CMC) para mejorar las propiedades funcionales de la goma xantana. También realizar una evaluación sensorial a las tortillas obtenidas.

Cuantificar los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón en cada una de las etapas del proceso para la elaboración de tortillas utilizando harinas nixtamalizadas por extrusión, en las mejores condiciones del proceso, con el objetivo de conocer el efecto de las temperatura del extrusor, humedad de acondicionamiento y de la goma xantana.

BIBLIOGRAFÍA

- A.A.C.C. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists. 2001. St. Paul, Minn.
- Agyare, K.K., Xiong, Y.L., Addo, K., and Akoh, C.C. 2004. Dynamic rheological and thermal properties of soft wheat flour dough containing structured lipid. *J. Food Sci.* 69: 297-302.
- Almeida-Dominguez, H.D., and Rooney, I.W. 1996. Avances en la manufactura y calidad de productos de maíz nixtamalizado. *Industria Alimentaria.* 18:4-13.
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. and Griffin E.L. Jr. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci Today.* 14: 1-12.
- Anónimo, 1991. A focus on gums. *Food Technology.* 45: 116-130.
- Arámbula- Villa, G., Figueroa, J.D.C., Martínez Bustos, F., Ordorica F.C.A., and González-Hernández. 1998. Milling and processing parameters for corn tortillas from extruded Instant dry masa flour. *J. Food Sci.* 63 : 338-341.
- Arámbula, V.G., Mauricio, S.R.A, Figueroa, C.J.D. , González-Hernández, J., and Ordorica, F.C.A. 1999. Corn masa and tortillas from extruded instant masa and tortillas from extruded instant corn flour containing hydrocolloids and lime. *J. Food Sci.* 6:120-124.
- Arámbula, V.G., González-Hernández, J, Moreno, M.E., Ordorica, F.C.A. 2002. Characteristics of tortillas prepared from dry extruded masa flour added with maize pericarp. *J. Food Sci.* 67: 1444-1448.
- Atwell, W. A., Hood, L. F., Lineback, D. R., Varriano-Marston, E., and Zobel, H. F. 1988. Terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World.* 33:306
- Bazua, C.D., Guera, R., and Stemer, H. 1979. Extruded corn flour as an alternative to lime heated corn flour for tortilla preparation. *J. Food Sci.* 44: 940-941.
- Bedolla, S. 1984. Desarrollo y caracterización de Harinas Instantáneas Utilizando Sorgo y Maíz por los Métodos de Cocimiento por Extrusión y Micronización. En Primera Reunión Panamericana de Extrusión de Alimentos CIATECH, Chihuahua México.

- Bell, D.A. 1990. Methycellulose as a structure enhancer in bread baking. *Cereal Foods World* 35: 1001.
- Bello-Pérez L. A., Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Núñez-Santiago, C., y Paredes-López, O. 2002. Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia*. 36:319-328.
- Campas-Baypoli, O.N. 1997. Cambios fisico-químicos en el almidón durante el proceso de elaboración y almacenamiento de la tortilla de maíz. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- Camire, A.L., and Clydesdale, F.M. 1981. Effect of pH heat treatment on the binding of calcium, magnesium, zinc, and iron to wheat bran and fractions dietary fiber. *J. Food Sci.* 46: 548-551.
- Chen, J., Serafin, F.F., Pandya, R.N., and Doun, H. 1991. Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *J Food Sci.* 56: 84-89.
- Christianson, D. D. 1982. Hydrocolloids interactions with starch. In *Food Carbohydrates*. D.R. Lineback (Ed.). Avi Publishing, Wesport, CT. Pp.399-402.
- Briones-Encinia, F., y Martinez-Garza, A. 2002. Eficiencia de algunos Diseños Experimentales en la Estimacion de una Superficie de Respuesta. *Agrociencia* 36 : 201-210.
- Design Expert 2002. Version 6.0.7 by STAT-EASE. Inc, MN. USA.
- Dziezak, D.J. 1989. Single- and twin-screw extruders in food processing. *Food Technology* 43 : 163-174.
- Enríquez-Ramos. 2004. Evaluación de los cambios fisicoquímicos del almidón extraído de las etapas del proceso tradicional de elaboración y durante el almacenamiento de la tortilla de maíz. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- FAO. Food an Agriculture Organization. 2003. Base de datos estadístico. Roma Italia.
- Faubion, J.M., Dreese, P.C. y Diehl, K.C. 1985. Dynamic rheological testing on wheat flour dough. in *rheology of wheat products*, editado por H. Faridi, pp.91-116. St. Paul, Minnesota. Am. Assoc. Cereal Chemists. Pp. 91-116.

- Faubion, J. M y Hosney, R.C. 1990. The Viscoelastic Properties of Wheat Flour Doughs En Dough Rheology and Baked Product Texture, editado por H. Faridi y J.M Faubion. New York. Van Nostrand Reinhold. pp. 42-62.
- Figueroa-Cárdenas, J.D., y Aguilar-García, R. 1997. El origen del maíz. Avance y perspectiva. 16:91-98.
- Flores-Farias, R., Martínez- Bustos. F., Salinas-Moreno, Y., Chang-Kil, Y., Hernández-González, J., and Ríos, E. 2000. Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalized mexican maize floursfor tortillas. J. Sci. Food Agric. 80:657-664.
- Flores-Farias, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-moreno, Y., and Ríos, E. 2002. Caracterization of Comercial Nixtamalized Maize Flours. Agrociencia 36:557-567.
- Fonseca, L.R. 2004. Aditivos e hidrocoloides en masa de nixtamal. Memorias congreso nacional de nixtamalización. Querétaro. , Qro. Pp. 67-70
- Galicia G.T. 2005. Producción y evaluación de la calidad de harinas nixtamalizadas obtenidas de maíz de calidad proteica. Utilizando el proceso de extrusión y técnicas de optimización. Tesis de Maestria. Universidad de Sonora.
- Gimeno, E., Moraru, C.I., and Kokini, J.L. 2004. Effect of xhantan gum and CMC on the structure and textura of corn fluor pellets expanded by microwave heating. Cereal Chemistry 8:100-107.
- Glicksman, M. 1982. Food Applications of Gums. In Food Carbohidrates. D.R. Lineback (Ed.). Avi Publishing, Wesport, CT. Pp. 270-285.
- Gómez, M.H., McDonough, C.M., Rooney, L.W., and Waniska, R.D.1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. J Food Sci, 54: 330-336.
- Gómez, M.H., Lee, J.K., McDonough, C.M., Waniska, R.D.,and Rooney, L.W. 1992. Corn starch changes during tortilla and tortilla chip processing. Cereal Chemistry. 69 : 275-279.
- Gómez, M. H., and Aguilera, J. M. 1983. Changes in starch fraction during extrusion cooking of corn. J Food Sci, 48: 378-382.
- Gómez, M.H., Rooney, L.W., Waniska, R., and Pflugfelder, R. 1987. Dry corn masa flour for tortilla and snack production. Cereal Foods World 32:372-376.

- González, S.E. 2005. Caracterización del comportamiento viscoelástico de masas elaboradas con semolina de variedades de trigos cristalinos (*Triticum durum*) mexicanos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- González, V.I. 2006. Evaluación de cambios fisicoquímicos que sufre el almidón en el proceso de elaboración de tortillas, utilizando harinas nixtamalizadas por extrusión de maíz de alta calidad proteica. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- González, J.R., Torres R.I., De Greef, D. M. 2001. Application of an ideal model to the scaling up of a laboratory extruder. *Journal of Food Engineering* 48:45-51.
- Goodwin, J.W. y Hughes, R.W. 2000. *Rheology for Chemists an Introduction*. The Royal Society of Chemistry. Pp. 107-131.
- Gracia, A.R., y Silva, E.B. 1992. Estudio de algunas variables del proceso de producción de tortilla de maíz a nivel planta piloto y de sus efectos en la textura de la masa y la tortilla. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- Gurkin, S. 2002. Hydrocolloids-ingredients that add Flexibility to tortilla Processing. *Cereal Foods World*. 47:41-43.
- Hanna, M.A., Chinnaswamy, R., Gray, D.R., and Miladinov, V.D. 1997. Extrudates of starch-xanthan gum mixtures as affected by chemical agents and irradiation. *J. Food Sci.* 62:816-820.
- Harper, J.M. 1989 Foods extruders and their applications. In "Extrusion Cooking". C. Mercier, P. Linko y J.M. Harper (ED). American association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, EUA. Pp. 1-15.
- Hoseney, R. C. 1991. Principios de ciencia y tecnología de los cereales. Ed. Acribia, S. A., Zaragoza. España.
- INEGI. 2005. Sector alimentario en México. Serie de estadísticas sectoriales. Pp. 231, 269.
- I.C.C. Standard methods of international association for cereal chemistry. 1984. Hans kock buch und offsetdruck gmbh, bielefeld. Germany. Westport, Connecticut.
- Inglett, G.E., 1970. Corn: Culture, Processing, Products. AVI Publishing Company, Inc, London, Inglaterra. Pp. 123-125.
- Khuri, A. A. and Cornell, J. A. 1987. Response Surfaces: Designs and Analyses. Marcel Dekker. Inc, New York, NY, EUA. Pp. 1-17,254.

- Lawton, B.T., Herderson, G.A., and Derlatka, E.J. 1972. The Effects of Extruder Variables on Gelatinization of Corn Starch. *Can J Chem Eng.* 50:168-172.
- Lee, C.C., and Mulvaney, S.J. 2003. Dynamic viscoelástica and tensile properties of gluten and glutenin gels of common wheats of different strength. *J. Agric. Food Chem.* 51:2317-2327.
- Lending, C.R. and Larkins, B.A. 1989. Changes in the zein composition of protein bodies during maize endosperm development. *Plant Cell . I:* 1011-1023.
- Lim, H.S., BeMiller, J.N., and Lim, S.T. 2003. Effect of dry heating with ionic gums at controlled pH on starch paste viscosity. *Cereal Chemistry.* 80:198-202.
- Magaña, B.E., 2005. Caracterización del comportamiento viscoelástico de masas elaboradas con harinas de variedades de trigos suaves (*Triticum aestivum*) mexicanos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- Mangelsdorf, P.C. 1986. The origin of corn. *Sci. Amer.* 8:72-78.
- Martínez-Bustos. F., Figueroa, J.D.C. and Larios, S.A. 1996. High lisien extruded products of quality protein maize. *J. Sci. Food Agric.* 71: 151-155.
- Martínez, F.H.E., Gayton, M.M., Figueroa, C.J., Martínez, B.F., Reyes, V.M., y Rodríguez, V.A. 2004. Efecto de algunos conservadores sobre la vida útil de tortillas de maiz obtenidas a partir de masa extrudida. *Agrociencia* 38: 285 - 292.
- Martínez-Flores, H., Martínez-Bustos F., Figueroa J., and González-Hernández, J. 1998. Tortilla from extruded masa as related to corn genotype and milling process. *J. Food Sci.* 63: 130-133.
- Masi, P., Cavella, S. and Sepe, M. 1998. Characterization of dynamic viscoelastic behavior of wheat flour doughs at different moisture contents. *Cereal Chemistry.* 75:428-432.
- Mercier, C., and Fillet, P. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. *Cereal Chemistry.* 52:283-297
- Milán-Carrillo, J., 2003. Alternativas tecnológicas para la producción de harinas instantáneas de Maiz (*Zea Mays L*) de calidad proteínica y garbanzo (*Cicer Arietinum*). Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Culiacán Sinaloa.

- Milán-Carrillo, J., Gutiérrez-Dorado, R., Perales-Sánchez, J.X.K., Cuevas-Rodríguez, E.O., Ramírez-Wong, B., and Reyes-Moreno, C. 2006. The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *Int. J. Food Sci. and Tech.* 41:727-736.
- Miller, R.A. and Hosney, R.C. 1993. The role of xanthan gum in white layer cakes. *Cereal Chemistry.* 70:585-588.
- Molina, M., R, Letona M. and Bressani R. 1977. Drum drying for the improved production of instant tortilla flour. *J. Food Science* 42:1432.
- Montemayor, E., and Rubio, M. 1983. Alkaline cooked corn flour technology and uses in tortilla and snack products. *Cereal Foods World.* 28:577.
- Montgomery, D. C. 1991. *Design and Analysis of Experiments.* 3ra Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY, EUA. p.278.
- Museo Nacional de Culturas Populares. 1987. El maíz, fundamento de la cultura popular mexicana. García Valadez (Ed). Dirección General de Culturas Populares SEP, México. p.114.
- Myers, R. H. 1971. *Response Surface Methodology.* Allyn and Bacon Publisher, Boston. MA, EUA. Pp. 26-106.
- Paredes-López, O., Serna-Saldívar, S. O. y Guzmán-Maldonado, S. H. 2000. Los alimentos mágicos de las culturas indígenas de México-el caso de la tortilla. El Colegio de Sinaloa (Ed), Culiacán, Sinaloa, México.
- Pomeranz, Y. 1991. *Fuctional Properties of Food Components.* Academic Press, Inc. Pp. 99-100.
- Pons, J.L. 2004. Maíz QPM, de riego y temporal, sus usos en nixtamalización. INIFAP-Bajío. Citado en I Congreso Nacional de Nixtamalización Octubre 2004. Querétaro, México.
- Pszczola, D.E. 2003. Ingredients. Plot thickeners, as gums add special effects. *Food Technology.* 57: 34-47.
- Ramírez-Wong, B. 1989. Measurement and evolution of textural and rheological properties of fresh corn masa. Philosophy Doctor Disertation. Texas A&M University, College Station.
- Ramirez-Wong, B., Sweat, V. E., Torres, P. I., and Rooney, W. L. 1993. Development of two instrumental methods for corn masa texture evaluation. *Cereal Chemistry.* 70: 286-290.

- Ramirez-Wong, B., Sweat, V.E., Torres, P.I., and Rooney, L.W. 1994. Cooking time, grinding, and moisture content effect on fresh corn masa texture. *Cereal Chemistry*. 71:337-343.
- Ramirez-Wong, B., y Ortega, F. 1994. Evaluación de las propiedades reológicas de la masa y tortillas de maíz comerciales. *Revista de Ciencias Alimentarias*. 2:1-8
- Robles, R. R. 1986. Cambios fisicoquímicos del almidón durante la nixtamalización del maíz. Tesis de maestría. IPN- Ciencias Biológicas. México, D.F. P. 113.
- Rodríguez, S.A. 2003. Caracterización del comportamiento viscoelástico dinámico de masas elaboradas con trigos harineros de variedades mexicanas cultivados en el ciclo agrícola 2001-2002. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora.
- Safari-Ardi, M. and Phan Thien, N. 1998. Stress Relaxation and oscillatory test to distinguish between doughs prepared from wheat flours of different varietal origin. *Cereal Chem.* 75: 80-84.
- Sahai, D., Buendía, O., and Jackson, S. 2001. Analytical Techniques for Understanding nixtamalized Corn Flour: Particle Size and Functionality Relationships in a Masa Flour Simple. *Cereal Chemistry*. 78: 14-18.
- Saldana G. and Brown H.E. 1984 Nutritional Composition of Corn and Flour Tortillas. *J. Food Sci.* 49: 1202-1203.
- San Martín-Martínez, E., Jaime-Fonseca, M.R., Martínez-Bustos, F., and Martínez-Montes. 2003. Selective nixtamalization of fractions of maize grain (*Zea mays* L.) and their uses in the preparation of instant tortilla flours analyzed using response surface methodology. *Cereal Chemistry*. 80:13-19.
- Serna-Saldivar, S. O. 1996. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. Ed. Tecnológico de Monterrey. México. Pp. 275-305.
- Serna-Saldivar, S.O., Cannet, R., Vargas, J., González, M., Bedolla, S. and Medina, C. 1988. Effect of soybean and sesame addition on the nutritional value of maize and decorticated sorghum tortillas produced by cooking. *Cereal Chem.* 64: 44-48.
- Serna-Saldivar, S. O., Gómez, M. H., and Rooney, L. W. 1990. Technology, chemistry, and nutritional value of alkaline-cooked corn products. In "Advances in cereal science and technology. Vol. X. ACC, Pomeranz. Y. Pp.243-307.

- Silva, B.A. 1998. Evaluación de algunos cambios físicos, químicos, texturales y reológicos durante la formación de la masa de maíz. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- Smewing, J. 2001. Hidrocoloides. En *textura de los alimentos medida y percepción*. Ed. Acribia. P. 273.
- Suhedro, E. L., Almeida-Domínguez, L., Rooney, L. W., Waniska, R. D., and Moreira, R. G. 1998. Tortilla bending technique: An objective method for corn tortilla texture measurement. *Cereal Chemistry*. 75: 854-858.
- Tang, J., and Ding, X. 1994. Relationship between functional properties and Macromolecular modification of extruded corn starch. *Cereal Chemistry*. 71:364-369.
- Vargas-López, J.M. 1987. Producción y evaluación de una harina para elaborar tortillas a partir de una mezcla maíz / sorgo en un extrusor-cocedor de bajo costo. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- Vázquez, L.M. 1995. Evaluación de los cambios en solubilidad que sufren las proteínas durante el proceso de elaboración de la tortilla de maíz, y sus efectos en la textura de la masa y el producto final. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora.
- Waniska, R.D. 1976. Methods to asses quality of boiled sorghum, gruel and chapaties from sorghum with different characteristics. M.S. Thesis. Texas A&M University, College Station, TX.
- Ward, F.M. and Andon, S.A. 1993 Water-soluble gums used in snack foods and cereal products. *Cereal Foods World*. Octubre. 38:748-752.
- Watson, S.A. 1987. Structure and composition. En "Corn: Chemistry and Technology", pp: 53-82, S.A. Watson y P.E. Ramstad (ed). American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, EUA.
- White, P., Abbas, I., Pollak, L., and Jhonson, L. 1990. Intra-and Interpopulation Variability of Thermal Properties of Maize Starch. *Cereal Chemistry*. 67:70-73.
- Yau, J.C., R.D., and Rooney, L.W. 1994. Effects of Food Additives on Storage Stability of Corn Tortillas. *Cereal Foods World* 39:396-401.
- Zazueta-Morales, J. J., Martínez-Bustos, F., Jacobo-Valenzuela, N., Ordorica-Falomir C. A., Paredes-López, O. 2002. Effects of calcium hydroxide and screw speed on physicochemical characteristics of extruded blue maize. *J. Food Sci*, 67:3350-3358..

Zobel, H. F. 1988. Molecules to granules: a comprehensive starch review. *Starch/stärke*. 40:44-50.