



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

**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

que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Tomás Galicia García

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

DEL AUTOR

Este trabajo se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del Grado de Maestro en Ciencias, Especialidad Almacenamiento y Procesamiento de Granos, de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos de la Universidad de Sonora, para ponerla a disposición de los interesados. Se puede tener autorización para reproducir y/o referirse a este escrito, en su totalidad o en parte, a través del Coordinador del Posgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos, cuando considere que dicha propuesta apoye al avance académico.

En cualquier otra situación se debe obtener autorización del autor.

ATENTAMENTE



Tomás Galicia García

Aprobación del Asesor

Este trabajo se aprobó en la fecha señalada:



Dr. Benjamín Ramírez Wong

11 Febrero 2005

Fecha

- 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.
- Warman, A. 1993. La historia de un Bastardo: Maíz y Capitalismo. Fondo de Cultura Economica, México. Pp 135-142.
- Watson, A.S., and Ramstad, E.D. 1987. Structure and composition. In Corn: Chemistry and Technology. De Published by the American Association of Cereal Chemists. Inc St. Paul, M.N.
- White, J. Pamela. 2003. Corn: Chemistry and Technology. AACC Published. St Paul, Minesota USA.
- Wolf, M.J., Bazuan, C.L., MacMasters, M.M., and Rist, C.E. 1952. Structure of the matare corn kernel. Cereal Chem 29:321-382.
- Wolf ,M., NcMasters M., Cannon J., Rosewell E., and Rist C. 1953. Preparation and somes properties of hemicelluloses from corn hulls. Cereal Chem 30:451-470.
- Wolf, M.J., Khoo, V., y Seckinger, H.L. 1969. Distribution and subcellular structure of endosperm protein in varieties of ordinary and high-lysine maize. Cereal Chem., 46: 253-263.
- Yen, J.T., Jensen, A.H., y Baker, D.H. 1976. Assessment of the concentration of biologically available vitamin B6 in corn and soybean meal. .1. Anim. Sci., 42: 866870.
- Zazueta-Morales., Martinez Bustos F., Jacobo-Valenzuela N.,Ordica Falomir, C., and Paredes-Lopez, O. 2002. Effects of Calcium Hydroxide and Screw Speed on Physicochemical Characteristics of Extruded Blue Maize. J Food Science 67(9): 3350-3358.
- Zobel, H.F.1988. Starch Crystal Transformations and their Industrial Importance. Starch/Stärke 40:1-7.

AGRADECIMIENTOS

A la *Universidad de Sonora*, especialmente al *Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos*, por darme la oportunidad de realizar y finalizar mis estudios de grado.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)*, por el apoyo económico otorgado para la realización del presente trabajo de Investigación.

Al *Dr. Benjamín Ramírez Wong*, por su valiosa dirección y asesoría en la elaboración del presente trabajo.

A la *Dra. Patricia Isabel Torres Chávez, Dr. Juan Manuel Vargas López y M.C. Ignacio Morales Rosas*, por su disponibilidad y valiosas aportaciones, en las correcciones del presente trabajo.

Al *Dr. Rafael Ramírez Bon*, del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) Unidad Querétaro, por su apoyo en las determinaciones del Análisis de Difracción de Rayos X.

A la *Dra. María Guadalupe Salazar García* por su colaboración en las mediciones de textura.

Al *M.C. Roberto Gutiérrez Dorado* de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) por su apoyo y asesoría en el paquete estadístico STAT-EASE Design Expert v 6.0.7.

Al *Ing. Alfonso Álvarez Aviles* de la Escuela de Agricultura de la Universidad de Sonora (USon), por la aportación del maíz MCP V-537C.

Un especial agradecimiento a toda las personas que contribuyeron de una manera u otra para el cumplimiento de mis estudios de grado, así como en la realización del presente trabajo de investigación.

Muchas Gracias.....

DEDICATORIA

A *Dios* por permanecer junto a mi día con día y por darme la oportunidad de concluir mis estudios de maestría.

A mis padres *Tomás* y *Guadalupe* por su apoyo incondicional, cariño y valiosos consejos.

A mis hermanos *Juan* y *David* por su ejemplo, amistad y apoyo que siempre me han brindado.

A mis abuelos maternos *David* y *Dolores* (+) , a mi tío *Gerardo* (+) y tía *Guadalupe* (+), por sus cuidados, cariño, enseñanzas y valores inculcados.

A mis tíos y primos: *Carlos* y *Marcela*, *Francisco*, *Marcela* y *Carlos*, por su gran apoyo, confianza y cariño, porque estado lejos me hicieron sentir en casa.

A mis abuelos paternos, tíos, primos, amigos, compañeros, maestros y a todas aquellas personas que sin recibir nada a cambio contribuyeron a superarme y formarme como hombre de provecho.

Por esto y mas:

GRACIAS

Tomás.

*Vengan, coman de este alimento que les doy, dejen lo que no sirve
y vivirán, ya que gracias al saber irán por el buen camino.*

Pro.9, 5-6.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	4
General.....	4
Específicos.....	4
REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	5
Generalidades del Maíz.....	5
Origen.....	6
Maíz Criollo o Normal.....	6
Maíz de Calidad Proteica (MCP).....	9
Obtención del MCP.....	9
Estructura del Grano de Maíz.....	11
Pericarpio.....	13
Endospermo.....	13
Germen.....	14
Pedicelo.....	14
Producción y Consumo.....	14
Composición y Valor Nutricional.....	15
Carbohidratos.....	17
Birrefringencia.....	17
Absorción de agua.....	17
Gelatinización.....	18
Retrogradación.....	18
Proteínas.....	19
Aceites y Ácidos grasos.....	20
Fibra dietética.....	20
Minerales.....	21
Vitaminas.....	21
Maíz de Calidad Proteica (MCP).....	21
Procesos de Elaboración de Tortilla de Maíz.....	22
Proceso tradicional.....	25
Proceso industrial para la obtención de harina de maíz nixtamalizado.....	25
Control de calidad.....	28
Cambios durante la Nixtamalización.....	33
Cambios estructurales.....	35
Almidón.....	35
Proteína.....	36
Lípidos.....	36
Vitaminas.....	36
Minerales.....	37

Procesos Alternos en la Elaboración de Harina de Maíz	
Nixtamalizada.....	37
Patentes.....	40
Extrusión.....	41
Componentes de un extrusor.....	42
Mecanismos de alimentación.....	44
Tornillo.....	44
Cañón.....	46
Dado.....	46
Mecanismos de corte.....	46
Nixtamalización por extrusión.....	48
Cambios que ocurren durante la Nixtamalización por el Proceso de Extrusión.....	51
Técnica de Optimización.....	55
MATERIALES Y METODOS.....	57
Materia Prima.....	57
Caracterización química.....	57
Molienda de Maíz.....	57
Proceso de Extrusión.....	59
Acondicionamiento.....	59
Extrusión.....	60
Descripción del equipo.....	59
Procedimiento.....	61
Porcentaje de expansión.....	61
Obtención de las Harinas Nixtamalizadas Extrudidas.....	62
Secado de los Extrudidos.....	62
Molienda.....	62
Evaluación de las Harinas.....	62
Humedad.....	64
Distribución de tamaño de partícula (DTP).....	64
Índice de tamaño de partícula (ITP).....	64
Índice de absorción de agua (IAA).....	65
Índice de material soluble (IMS).....	66
Densidad aparente (Dap).....	66
pH.....	66
Color.....	67
Difracción de rayos X.....	68
Evaluación de las Masas.....	68
Elaboración de las masas.....	68
Capacidad de absorción de agua subjetiva (CAAS).....	69
Humedad.....	69
Medición de Textura.....	69
Evaluación de las Tortillas.....	70
Preparación.....	70
Evaluación.....	72
Características físicas.....	72

Propiedades texturales.....	72
Firmeza.....	72
Rollabilidad.....	73
Diseño Experimental y Análisis Estadístico.....	73
Optimización.....	77
Análisis de datos no optimizados.....	78
RESULTADOS Y DISCUSION.....	79
Caracterización de la Materia Prima.....	79
Composición química del maíz y harina comercial.....	79
Caracterización del producto expandido.....	81
Caracterización de la harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión.....	84
Humedad de la Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión (HUH).....	84
Índice de Tamaño de partícula (ITP).....	86
Densidad Aparente (DAP).....	87
pH.....	89
Índice de material soluble (IMS).....	91
Difracción de Rayos X (RX).....	93
Caracterización de la masa elaborada con la harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión.....	96
Capacidad de Absorción de Agua Subjetiva (CAAS).....	96
Humedad en masa (HUMA).....	98
Caracterización de la Tortilla elaborada con la harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión.....	100
Características físicas de las tortillas.....	100
Inflado.....	104
Rolabilidad.....	106
Firmeza.....	111
Correlaciones entre diferentes correlaciones.....	114
Condiciones para la Obtención de Harina de Maíz MCP Extrudida.....	116
Modelos de Predicción.....	118
Índice de absorción de Agua (IAA).....	118
Color.....	124
Luminosidad (CL).....	124
Cb.....	126
Factor de compresión tensión (FCT).....	130
Optimización del proceso de extrusión.....	132
CONCLUSIONES.....	134
RECOMENDACIONES.....	137
BIBLIOGRAFIA.....	138

LISTAS DE TABLAS

Tabla		Página
1.	Superficie cultivada, producción y rendimiento de maíz normal en el mundo.....	16
2	Perfil de aminoácidos del grano de maíz blanco dentado y maíz de calidad proteica.....	23
3	Composición química del grano de maíz blanco dentado y de calidad proteica.	24
4	Variables y niveles de nixtamalización del maíz molido	74
5	Matriz de diseño para la nixtamalización del maíz molido.....	76
6	Composición Química de Maíz (MCP) y Harina Comercial.....	80
7	Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre el extrudido de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.....	82
8	Valores promedio de la expansión de los extrudidos de los tratamientos	82
9	Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la Humedad de la Harina (HUH) e Índice de Tamaño de Partícula (ITP) de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión (HMNE).....	85
10	Valores promedio de la humedad de la harina e índice del del tamaño de partícula.....	85
11	Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la densidad aparente y pH de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión (HMNE).....	88
12	Valores promedio de la densidad aparente y el pH.....	88
13	Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre el Índice de Material Soluble de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión	92
14	Valores promedio del Índice de Material Soluble	92
15	Análisis de Varianza, Valor de F, de la Capacidad de Absorción de Agua Subjetiva y la humedad en masa elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión ...	97
16	Valores promedio de la Capacidad de Absorción de Agua Subjetiva y Humedad en Masa.....	97
17	Análisis de Varianza, Valor de F, del peso, diámetro y espesor de la tortilla elaborada con harina nixtamalizada por extrusión a las 2h de almacenamiento.....	101
18	Valores promedio del diámetro, peso y espesor de la tortilla elaborada con harina nixtamalizada por extrusión a las 2h de almacenamiento.....	101

19	Análisis de Varianza, Valor de F, del Inflado de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión ...	105
20	Valores Promedio del Inflado de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión.	105
21	Análisis de Varianza, Valor de F, de la rollabilidad a 2h, 24h, 48h de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión	107
22	Análisis de Varianza, Valor de F, de la firmeza a 2h, 24h, 48h de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión	107
23	Valores Promedio de la rollabilidad y firmeza de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión a 2h, 24h y 48 h.....	108
24	Correlaciones simples (r) entre los parámetros de % Expansión (%EXP), Índice de Tamaño de Partícula (ITP), Índice de Material Soluble (IMS), Índice de Absorción de agua (IAA), pH, Densidad Aparente (DAP), Color L,a,b en harina de maíz nixtamalizada por extrusión (HMNE); Rolabilidad (ROL) y Firmeza (FIR) de la tortilla a 48 h (C), Inflado de la tortilla.....	114
25	Diseño experimental utilizado para la obtención de diferentes combinaciones de humedad de la harina acondicionada, temperatura y velocidad de tornillo utilizado en el proceso de extrusion, así como los resultados experimentales para las variables respuesta.	117
26	Coefficientes de regresión y análisis de varianza de las ecuaciones de primer orden (modelos de predicción).....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.	(A) Planta de Maíz (<i>Zea mays</i> L) y sus posibles antecesores. (B) comparación del tamaño de la mazorca y espiguillas (frutos) del <i>Tripsacum</i> y teocintle.....	7
2.	Morfología de la planta de Maíz (<i>Zea mays</i> L)	8
3.	Inflorescencia en maíz (<i>Zea mays</i> L).....	10
4.	Estructura del grano de maíz: corte longitudinal.	12
5.	Proceso tradicional utilizado para elaborar tortillas.	26
6.	Proceso Industrial de producción de harinas nixtamalizadas de maíz.....	27
7.	Representación de los valores de L, a y b en los colores sólidos Judd-Hunter Lab.....	30
8.	Curva típica de fuerza distancia obtenida en el Instron en la prueba textural de masa fresca, dura, óptima y masa pegajosa.....	32
9.	Proceso tradicional de Nixtamalización para la producción de derivados de la masa y tortilla.....	34
10.	Componentes básicos del extrusor de tornillo simple.....	43
11.	Configuraciones de tornillos comunes empleados en extrusores de tornillo simple.....	45
12.	Configuraciones típicas de las paredes internas del cañón en un extrusor de tornillo simple, vistas longitudinal y frontal (1,2). (A) Diámetro interior liso, (B) acanalado (ranura) longitudinal, (C) Acanalado (ranuras) en espiral.....	47
13.	Limpieza y Preparación del grano de Maíz del Maíz de Calidad Proteica.....	58
14.	Proceso de extrusión utilizando maíz molido de alta calidad proteica	61
15.	Producción de la harina de maíz de alta calidad proteica nixtamalizada por extrusión (HMNE).....	63
16.	Producción de masa y tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión	71
17.	Difractogramas de las Harinas de Maíz Nixtamalizada por Extrusión (H1-H12) en comparación con las Harinas de Maíz Integral (H13) y Comercial (H14).....	94
18.	Comportamiento del peso (PT), diámetro (DT) y espesor (ET) de la tortilla elaborada con HMNE a 2 ,24 y 48h de almacenamiento.....	103
19.	Rollabilidad en tortilla elaborada con HMNE a 2h, 24 h y 48 h de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C).....	109

20.	Firmeza en tortilla elaborada con HMNE a 2h, 24 h y 48 h de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C).....	112
21.	Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la temperatura de extrusión (T) a una velocidad del tornillo (VT) de 85 rpm (1-2), 100 rpm (3-4) y 115 rpm (5-6), sobre el índice de absorción de agua (IAA) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).....	120
22.	Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la velocidad del tornillo del extrusor (VT) a una temperatura (T) de 120 °C (1-2), 130 °C (3-4) y 140 °C (5-6), sobre el índice de absorción de agua (IAA) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).	122
23.	Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la velocidad del tornillo del extrusor (VT) a una temperatura (T) de 120 °C (1-2), 130 °C (3-4) y 140 °C (5-6), sobre la luminosidad del color (CL) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).	125
24.	Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la temperatura del extrusor (T) a una velocidad del tornillo en el proceso de extrusión (VT) de 85 rpm (1-2), 100 rpm (3-4) y 115 rpm (5-6), sobre el color b + (Cb) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).....	127
25.	Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la velocidad del tornillo (VT) y la temperatura del extrusor (T) a una humedad de la muestra acondicionada (H) de 27 % (1-2), 29 rpm (3-4) y 31 % (5-6), sobre el Factor de Compresión Tensión (FCT) de las masa elaboradas con harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).	127
26.	Regiones de mejores combinaciones de humedad de la muestra acondicionada (H), temperatura (T) y velocidad del tornillo (VT) en el proceso de extrusión.	129

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
Am	Altura de la mazorca
Ap	Altura de la planta
AACC	Asociación Americana de a Química de los Cereales
ANDEVA	Análisis de Varianza
A	Amstrongs
B_0	Coefficientes estimados por el método de mínimos cuadrados
CAAS	Capacidad de Absorción Subjetiva de Agua
Cb +	Tendencia al amarillo
CIMMYT	Centro de Investigación del Mejoramiento de Maíz y Trigo
CL	Luminosidad
CMC	Carboximetilcelulosa
CVC	Catalogo de variedades factibles de certificación
cm ³	Centímetros cúbicos
D	Diámetro
d	Distancia interplanar
DAP	Densidad Aparente
DMS	Diferencia Mínima Significativa
DT	Diámetro de la Tortilla
DTP	Distribución del Tamaño de Partícula
ET	Espesor de la Tortilla
E.U.A	Estados Unidos de América
ε	Error experimental
FAO	Food Agriculture Organization
FCT	Factor de Compresión Tensión
Fig	Figura
FIR	Firmeza en tortilla

FNo M	Factor Numero de Malla
g	Gramos
H	Humedad
h	Hora
Ha	Hectáreas
HMNC	Harina de Maíz Nixtamalizada Comercial
HMNE	Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión
HTST	Temperaturas altas en tiempos cortos
HUH	Humedad de la Harina
HUMA	Humedad en Masa
IAA	Índice de Absorción de Agua
IMS	Índice de Material Soluble
INEGI	Instituto Nacional de Geografía e Informática
INF	Inflado
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
ITP	Índice de Tamaño de Partícula
kg	Kilogramos
KPa	Kilopascales
kW	Kilowatts
λ	Longitud de onda
m	Metros
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
MT	Millones de Toneladas
MCP	Maíz de Calidad Proteica
MSR	Metodología de Superficie de Respuesta
μm	Micrones

N	Newtons
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma oficial Mexicana
Pa	Pascales
PG	Peso del Gel
PMbs	Peso de la muestra en base seca
PMs	Peso de la muestra seca
PT	Peso de la Tortilla
ROL	Rollabilidad
SAGAR	Secretaria de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural
T	Temperatura
Θ	Angulo de difracción
V	Variedad
VT	Velocidad del Tornillo
W	Watts
X_n	Variables Independientes
Y_i	Función de la respuesta genérica

RESUMEN

Se elaboraron harinas de maíz nixtamalizadas utilizando el proceso de extrusión utilizando como materia prima maíz de calidad proteica (MCP V-537C), el cual se molio a un tamaño de partícula de 0.5 mm (500 μm , tamiz US No35) para después ser acondicionado a una concentración de cal del 0.3 %, así como, distintos valores de humedad que van desde los 27 a 31%. Las muestras fueron extrudidas a un rango de temperatura de 120-140 °C y velocidad del tornillo de 85-115 $^{\circ}\text{C}$ en un extrusor de tornillo simple (Marca Brabender Instruments; Modelo E 19/25 D, Inc NJ E.U.A) a una tasa de compresión 1:1 con un diámetro del dado de 3 mm, el extrudido fue secado y posteriormente molido en molino de cuchillas a un tamiz US No 35 (500 μm), obteniendo así la harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión (HMNE).

A diferencia de la harina comercial (HMNC) el maíz molido presentó un mayor contenido de cenizas y grasas debido a la presencia de pericarpio y germen, así como un ligero incremento en el valor de las proteínas. El producto expandido no presentó una diferencia notable con el diámetro del dado lo que nos indica que las condiciones utilizadas fueron estables. El índice de tamaño de partícula, la distribución del tamaño de partícula y la densidad aparente presentaron diferencia con la HMNC debido principalmente a la molienda empleada. El patrón de difracción de rayos X muestra un mayor efecto del daño térmico y mecánico que se da en el proceso de extrusión a condiciones de humedad, temperatura y velocidad del tornillo altas (31%, 140 °C y 115 rpm, respectivamente). La diferencia entre la capacidad de absorción de agua de la HMNE y HMNC se deben a la presencia de aditivos, sin embargo las harinas extrudidas presentaron valores cercanos al comercial. La tortilla elaborada con HMNE 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. De acuerdo al análisis de correlación entre las diferentes determinaciones se observa que el

134.84 °C de temperatura y 112.39 rpm de velocidad de extrusión, que presentan características similares a las HMNC.

El proceso de extrusión muestra ser una alternativa para la producción de harina de maíz nixtamalizada con la que se pueden elaborar masas y tortillas con buenas características texturales, por lo que este proceso tiene un gran potencial para ser utilizado a nivel industrial.

Palabras Clave: Nixtamalización, extrusión, maíz de calidad proteica, harina de maíz nixtamalizada, optimización.

al análisis de correlación entre las diferentes determinaciones se observa que el índice de tamaño de partícula influye sobre el inflado, la DAP sobre el factor compresión tensión, así como el IMS sobre la firmeza.

Para conocer la mejor combinación de las variables del proceso en la producción de la HMNE, se utilizó como técnica de optimización, la metodología de superficie de respuesta. Los números y niveles de variación de las variables del proceso fueron basados de datos bibliográficos así como de ensayos preliminares. Para cada variable respuesta se utilizaron los principales indicadores de calidad en harinas (Índice de absorción de agua y color L y b+), masas (factor de compresión tensión) que influyen de manera directa en el producto final (tortilla). Las variables que más influyen sobre el índice de absorción de agua (IAA) son la humedad y la temperatura, el comportamiento que más favoreció a la variable respuesta IAA se presentó al disminuir la velocidad del tornillo a alta temperatura (140 °C) y baja humedad (27 %), así como, al incremento de la temperatura a un valor de humedad baja (27 %) y velocidad del tornillo alta (115 rpm). La humedad es la variable que más influye en la luminosidad (CL) y se presentó un mayor valor conforme se incremento la temperatura a mayor humedad (31 %) y velocidad de tornillo (115 rpm). En la tendencia al color amarillo (Cb+) la variable que más influyó fue la humedad y la interacción humedad-temperatura, por lo que el valor Cb+ presentó mejores condiciones cuando se incremento la humedad (31 %) y temperatura (140 °C) a una velocidad del tornillo mayor. Para el factor Compresión-Tensión la variable que más influyó fue la humedad y velocidad del tornillo, las mejores condiciones se observaron a baja velocidad del tornillo (85 rpm) y humedad (120 °C). Las mejores combinaciones de las variables del proceso se obtuvieron a través de la superposición de los gráficos de contorno y se escogió el punto central de cada gráfico, para posteriormente tener el promedio de los valores centrales, que nos indican el punto donde se presentan las mejores combinaciones de las variables del proceso de extrusión para la elaboración de HMNE: 27.72 % de humedad,

INTRODUCCION

Hallazgos arqueológicos demuestran que desde el origen de la civilización precolombina el maíz ha sido y es en la actualidad parte fundamental en la alimentación de los Mexicanos. A través del cultivo intensivo de este cereal así como, mediante la domesticación, selección y mejoramiento de variedades, se ha dado origen a diversas características dentro de esta misma especie, como tamaño de la planta, ciclo vegetativo, rendimiento, entre otros. En la actualidad el maíz juega un papel muy importante como materia prima en la elaboración de diversos productos tanto para uso industrial como para consumo animal o humano, como los obtenidos de harinas nixtamalizadas por ejemplo: nachos, tostadas, tamales, atoles y tortillas. (Lomeli, 1997; Bressani *et al.*, 1990).

El maíz es el alimento que aporta mas del 50 % de la ingesta por gran parte de la población en México. Lo que representa una oportunidad para fortalecer el nivel nutricional del consumidor mediante la inclusión en la dieta de maices mas nutritivos con una mayor cantidad y calidad de proteína (MCP), tal como la variedad (V) 537C, desarrollada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en conjunto con el Centro de Investigación del Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), que proporciona un mejor balance de aminoácidos esenciales (Gomez-Noel *et al.*, 2003).

La principal transformación a la que se somete el maíz es la cocción alcalina (nixtamalización), que es un proceso ancestral transmitido a través de generaciones en donde básicamente se siguen los mismos pasos y procedimientos empleados en la elaboración principalmente de tortillas, y hasta nuestros días en una amplia gama de productos alimenticios obtenidos a través de este proceso. La elaboración tradicional empleada por los aztecas consiste en la cocción del grano de maíz en agua con cal y posteriormente un reposo

durante la noche, una vez que se desprende el pericarpio del grano (nixtamal) es separado del agua de cocción (nejayote), lavado y molido, obteniendo así la masa que posteriormente se moldea y coce en discos aplanados para obtener la tortilla (Martínez-Herrera *et al.*, 1979). Con el uso del maíz de calidad proteica (MCP) se han obtenido buenos resultados en el procesamiento alcalino principalmente con maíces de coloración blanca (White, 2003), respecto a la V-537C, se ha nixtamalizado siguiendo los mismos pasos del proceso tradicional diferenciándose del maíz criollo por presentar un mayor tiempo de cocción (Guerra, 2002). A través del proceso de nixtamalización tradicional se da origen a un producto con características organolépticas aceptables, sin embargo, el tiempo y energía utilizados en el proceso son altas (Pflugfelder, 1986).

Uno de los mayores logros en la industria de productos nixtamalizados de maíz es la fabricación a nivel industrial de harinas instantáneas (que tiene como base el proceso tradicional sistematizado a gran escala). Como resultado del ritmo acelerado de vida se hace más necesario consumir harinas de maíz nixtamalizado, que se presenten en una forma más accesible al consumidor (Bello *et al.*, 2002) para la elaboración de diversos productos. En el caso de la producción comercial de harina de maíz nixtamalizado a partir de MCP no se presenta de manera documentada un producto comercial a través de este proceso. Sin embargo, se han probado en otros procesos (prueba de quebrado en semillas germinadas, producción de semillas viables, entre otras) (White, 2003).

Las modificaciones hechas en el proceso de fabricación de harina de maíz nixtamalizada instantánea buscan minimizar los tiempos principalmente el de cocción, donde se utiliza altas temperaturas por corto tiempo, lo que trae como consecuencia la disminución de agua y energía en forma de calor. Este es el caso de la nixtamalización por extrusión que representa una alternativa tecnológica para la producción de harina de maíz nixtamalizada instantánea en

donde se procesa el grano de maíz integral acondicionada a tiempos y temperaturas controladas.

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 (Vargas-López *et al.*, 1990; Milán-Carrillo *et al.*, 2002). Así como las condiciones del proceso optimizadas para la producción de harina de maíz (MCP) instantánea (Reyes-Moreno *et al.*, 2003).

Por lo que es de importancia observar el efecto de las variables de proceso (humedad de la muestra acondicionada, velocidad del tornillo y temperatura de extrusión) en las propiedades físicas, químicas y reológicas de la harina obtenida, así como la masa y tortilla elaborada con esta harina, además del efecto combinado de estas variables para la elaboración de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión, y mediante la técnica de optimización obtener la mejor combinación de los tratamientos.

OBJETIVOS

General

Producir y Evaluar la calidad de harinas nixtamalizadas obtenidas de maíz de calidad proteica utilizando el proceso de extrusión y técnicas de optimización.

Específicos

1. Obtener harinas de maíz nixtamalizadas por el proceso de extrusion a distintas combinaciones de humedad de la muestra acondicionada, temperatura y velocidad del tornillo en el extrusor a partir de maíz de calidad proteica.
2. Caracterizar las propiedades físicas y químicas de las harinas nixtamalizadas obtenidas por el proceso de extrusión.
3. Evaluar las características texturales de las masas y tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado obtenido por el proceso de extrusión.
4. En base a las técnicas de optimización, obtener a que condiciones de humedad de la muestra acondicionada, temperatura y velocidad del tornillo del extrusor, se obtienen las mejores características físicas, químicas y texturales de las harinas de maíz nixtamalizado, en comparación con una harina comercial.

REVISION BIBLIOGRAFICA

Generalidades del Maíz

Origen

El origen y la evolución del maíz ha sido un misterio porque ha llegado a nosotros de una manera altamente evolucionada, sin conocerse formas intermedias. A diferencia de los cereales del viejo mundo en donde se poseen variedades silvestres que se encuentran en la naturaleza, el maíz es conocido solamente por la especie cultivada (*Zea mays* L). Además todas las plantas se reproducen solas en la naturaleza, pero el maíz es la única planta que ocupa la intervención del hombre para su supervivencia, por lo que la ausencia de maíz en estado silvestre se explica por su incapacidad para reproducirse en forma natural (Warman, 1993).

El cultivo del maíz tuvo su origen, con toda probabilidad, en América Central, específicamente en México, de donde se difundió hacia el norte hasta Canadá y hacia el sur hasta Argentina. La evidencia más antigua de la existencia del maíz, data de unos 7000 de antigüedad y ha sido encontrada por arqueólogos en el valle de Tehuacán (Puebla, México) aunque es posible que hubiese otros centros secundarios de origen en América (FAO, 1993).

Existen diversas hipótesis sobre el origen y evolución del maíz, pero la mayoría de los investigadores consideran que este cereal se desarrolló a partir del "teocintle" (*Euchlaena mexicana* Schrod) ya sea por selección directa, por mutación o por la cruce del teocintle con un pasto desconocido (con probabilidad ya extinto) (FAO, 1993; Mangelsdorf, 1986; Reyes, 1990). Otros informan que se originó a partir de un maíz silvestre, hoy en día desaparecido, en donde los granos se encontraban individualmente cubiertos por una gluma o por braqueas como ocurre con la mayoría de los cereales y pastos. La teoría tripartita

menciona: (a) el maíz cultivado se origina de un maíz tunicado, (b) el teocintle es un híbrido proveniente de la cruce entre el maíz y el *Tripsacum* (teocintle guatemalteco), y (c) que la mayoría de las modernas variedades de maíz son producto de mezclas con teocintle, *Tripsacum* o con ambos (Mangelsdorf, 1986) (Fig. 1). Después de mas de 7000 años de evolución, el maíz es el producto del trabajo de las antiguas civilizaciones de América quienes fundaron sus culturas sobre la base de este cultivo, no en vano se llaman asi mismos, "La gente de Maíz" (Museo nacional de Culturas Populares, 1987).

Maíz Criollo o Normal

El nombre científico del maíz es *Zea mays* y se encuentra dentro de la familia Gramínea y la tribu Tripsaceae (Maydeae). Pertenece al género *Zea* y solamente la especie *mays*, se incluye en el género. De acuerdo con la estructura de los granos, el maíz puede dividirse en distintas subespecies (*Zea mays* *indurata*, *amylacea*, *everta*, *saccharata*, *tunicata*, *cerea*, japónica y *gracillina*) (Matz, 1959).

El maíz (*Zea mays* L) es una planta anual con un ciclo vegetativo que va de 80 a 120 días desde la siembra hasta la cosecha. La altura de la planta es muy variable, existen variedades enanas de 40 a 60 cm, hasta cultivares gigantes de 200 a 300 cm (Fig. 2). Se encuentra dentro de las especies monoicas, esto nos indica que presenta flores masculinas y femeninas en la misma planta; las flores son estaminadas (masculinas) y pistiladas (femeninas), por lo que de estas últimas surgen las mazorcas. Las flores masculinas y femeninas se encuentran en inflorescencias. La inflorescencia de flores masculinas es una espiga o panoja, la flor masculina esta formada por glumelas, estambres y un pistilo rudimentario. En cambio las inflorescencias femeninas

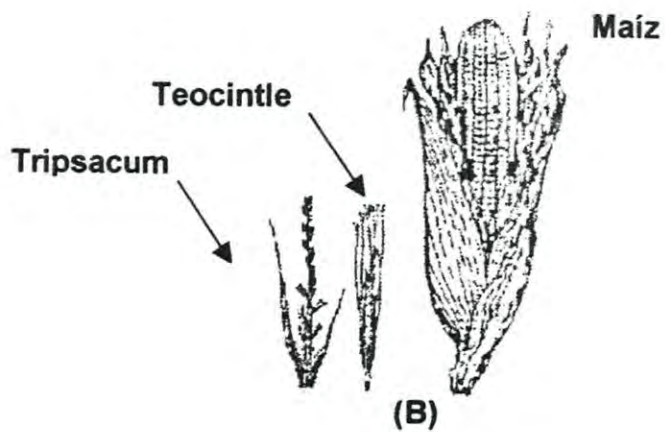
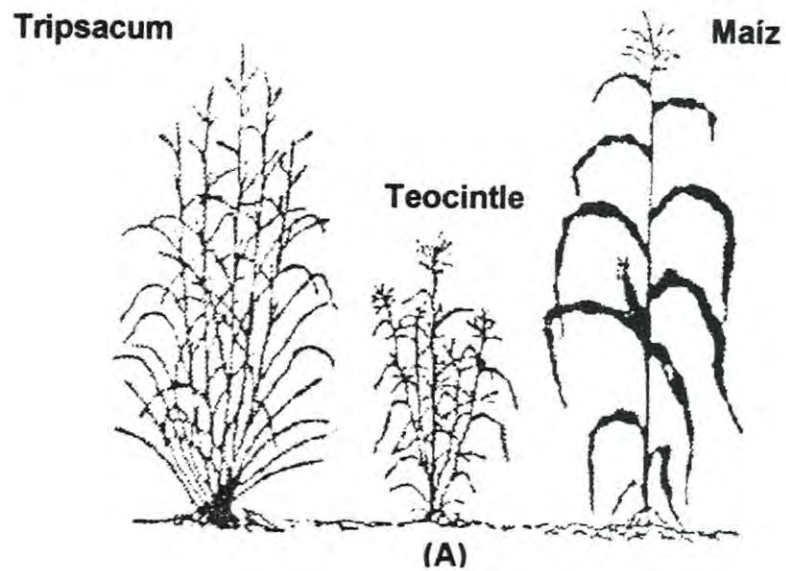


Figura 1. (A) Planta de Maíz (*Zea mays* L) y sus posibles antecesores. (B) comparación del tamaño de la mazorca y espiguillas (frutos) del Tripsacum y teocintle.

Paredes-López *et al.* (2000).

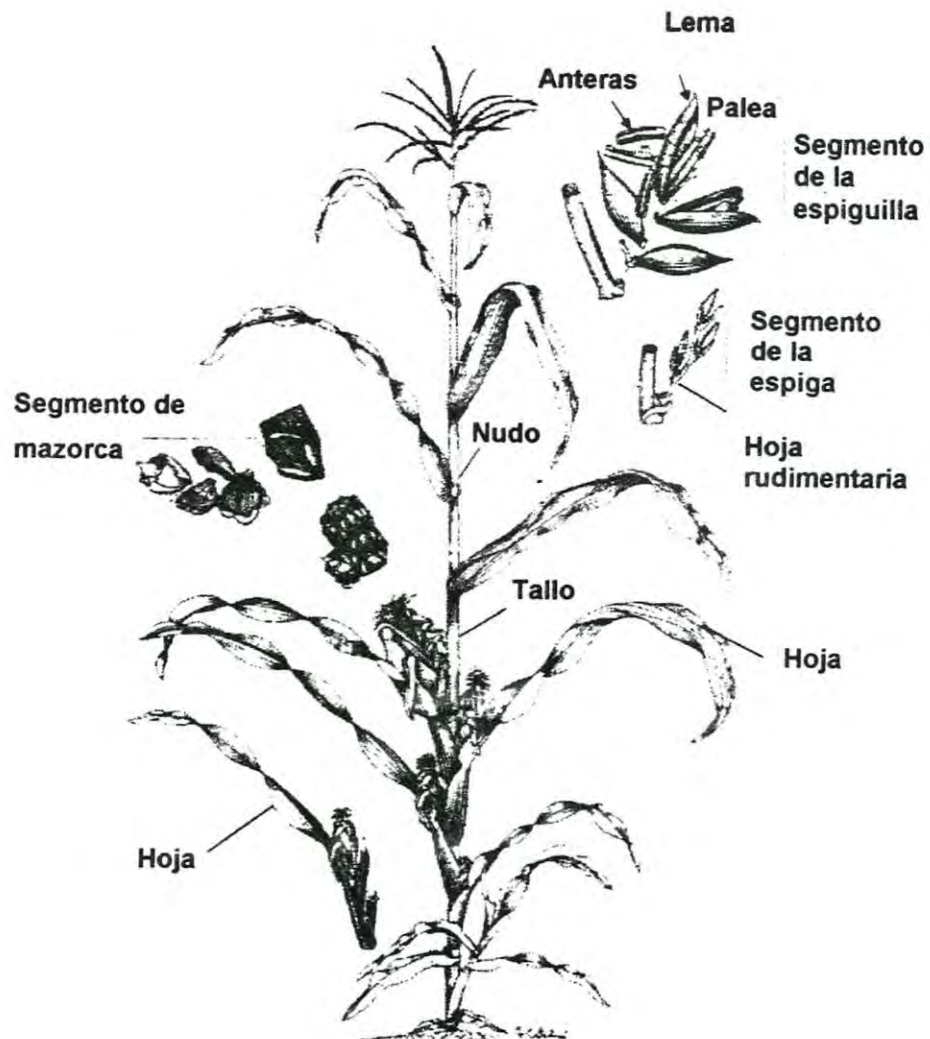


Figura 2. Morfología de la planta de Maíz (*Zea mays* L).

Saad (1999).

constan de una rama lateral modificada con entre nudos muy cortos, hojas que cubren la inflorescencia y el estigma (lo que se conoce como pelos de elote) que reciben el polen. La disposición de las flores favorece la fertilización cruzada, solo un 5 % de las plantas se autofecundan, la diseminación del polen es una labor que se realiza con el viento, los insectos y la gravedad (Fig. 3). Cada planta tiene de una a tres mazorcas dependiendo de la variedad y de las condiciones ambientales (Saad, 1999).

El maíz es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal; Warman (1993) hace mención de que ocupa una posición que se puede comparar con la del hombre en el reino animal.

Maíz de Calidad Proteica (MCP)

Obtención del MCP. El maíz con alta calidad de proteína se deriva del aprovechamiento del gen mutante opaco o2o2, expresado en su versión homocigoto recesiva con mayor contenido de lisina y triptofano (Mertz *et al.*, 1964). Durante la década de los 60 y 70's, en diversos países se realizaron estudios para introducir este carácter a sus maíces. Sin embargo, al alto valor nutritivo de estos maíces se ligaban características indeseables como: grano con textura suave, bajo peso, y poca resistencia a enfermedades y plagas de almacén, problemas que limitaron el avance de estas investigaciones. Por lo anterior, mediante técnicas de mejoramiento genético, los doctores Surinder K y Evangelina Villegas (CIMMYT, 2001), incorporaron una serie de genes especiales al maíz opaco o2o2, llamados genes modificadores de la textura del endospermo y en la década de los 80's se obtuvo lo que ahora se conoce como maíz con alta calidad de proteína (MCP o QPM por sus siglas en inglés) que a diferencia del maíz normal presenta un contenido más alto de lisina y triptófano (40-50 % y 35-40 % respectivamente) así como una textura de grano más dura que la del maíz opaco o2o2. Esto da una apariencia más semejante al maíz

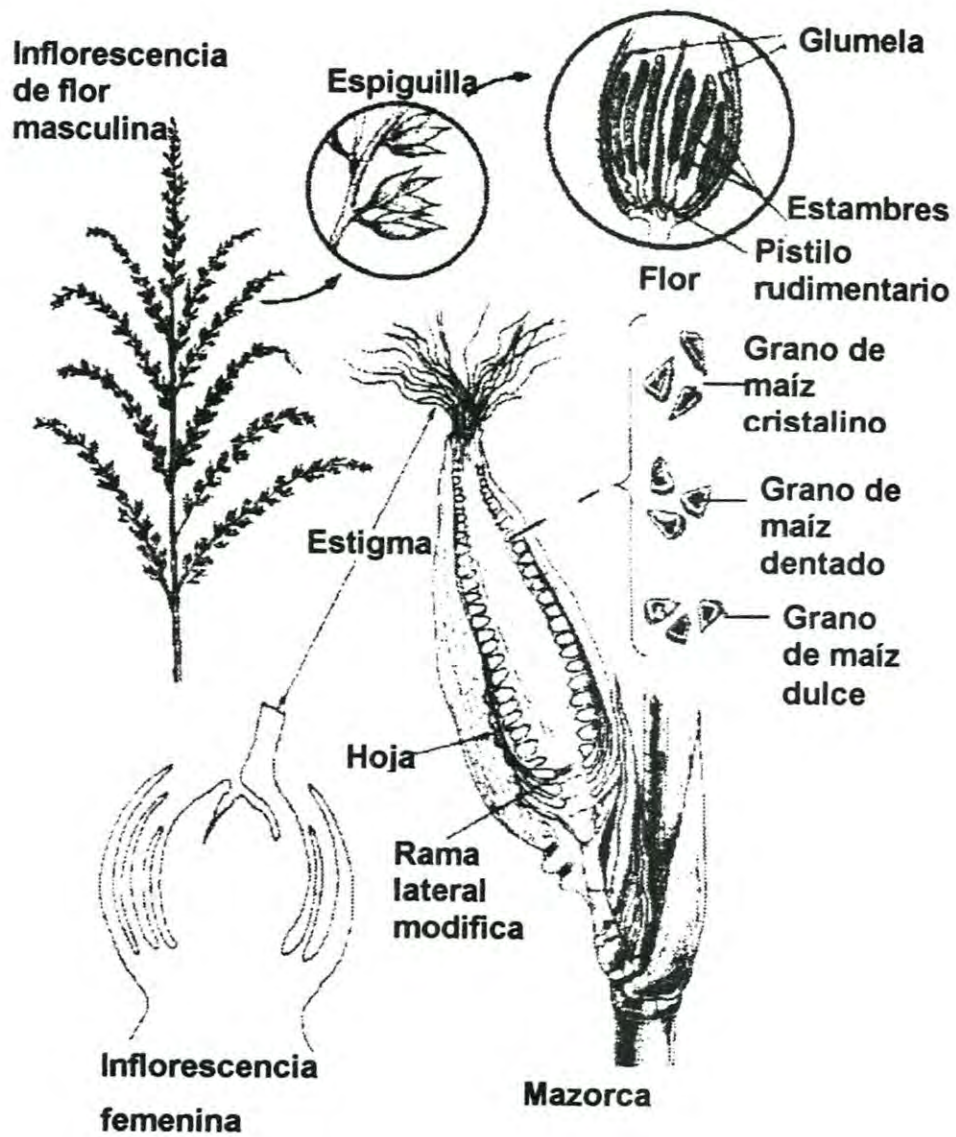


Figura 3. Inflorescencia en maíz (*Zea mays* L).

Saad (1999).

normal (Larkins *et al.*, 1994; Vasal 1994). A partir de 1996, el Centro de Investigación en Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) comenzó a utilizar este material para la floración de híbridos y variedades obteniendo así líneas sobresalientes, como es el caso de la V-537C.

El MCP V-537C es una variedad de polinización libre, obtenida a través de la selección recurrente, mediante la recombinación genética de 10 familias sobresalientes de la población 63, en la localidad de Poza Rica Ver., durante el verano de 1987 se encuentra inscrita en el catálogo de variedades factibles de certificación (CVC) con el número de registro 13322-MAÍZ-565-200900/C (INIFAP, 2001). Esta variedad presenta en el ciclo de temporal una altura de planta (Ap) de 222 cm y de mazorca (Am) de 110 cm, una relación Am/Ap de 0.47 lo que nos indica que presenta tolerancia al acame, presenta floración a 57 días y 90 a 100 días a madurez fisiológica. Para el ciclo Otoño-Invierno, la altura de la planta y mazorca se reduce a 183 cm (Ap) y 86 cm (Am) su ciclo se propaga a 72 días a floración y 110 días a madurez fisiológica. Posee una longitud del pedúnculo y de la mazorca de 12 y 15.3 cm respectivamente, la forma de la mazorca es cilíndrica con un diámetro de 5.5 cm con 14 hileras y un número de 33 granos por hilera. La textura del grano es semidentada, la coloración tanto del grano como del endospermo es blanca y el número de semillas por 100 g es de 277. La cobertura de la mazorca está entre el 85 al 90 %, el aspecto de la mazorca es bueno así como su sanidad. Bajo condiciones de riego en el ciclo Otoño-Invierno se tiene reportado un rendimiento experimental de 6.43 y 6.01 Toneladas/hectárea (Ton/Ha) y para el ciclo primavera-verano de 5.36 y 5.44 Ton/Ha (INIFAP, 2001).

Estructura del Grano de Maíz

El grano de maíz es conocido como cariopsis (ya que está conformado por la fusión de la semilla con su cubierta formando así un grano simple). El grano maduro está compuesto por cuatro partes mayores (Fig. 4): pericarpio

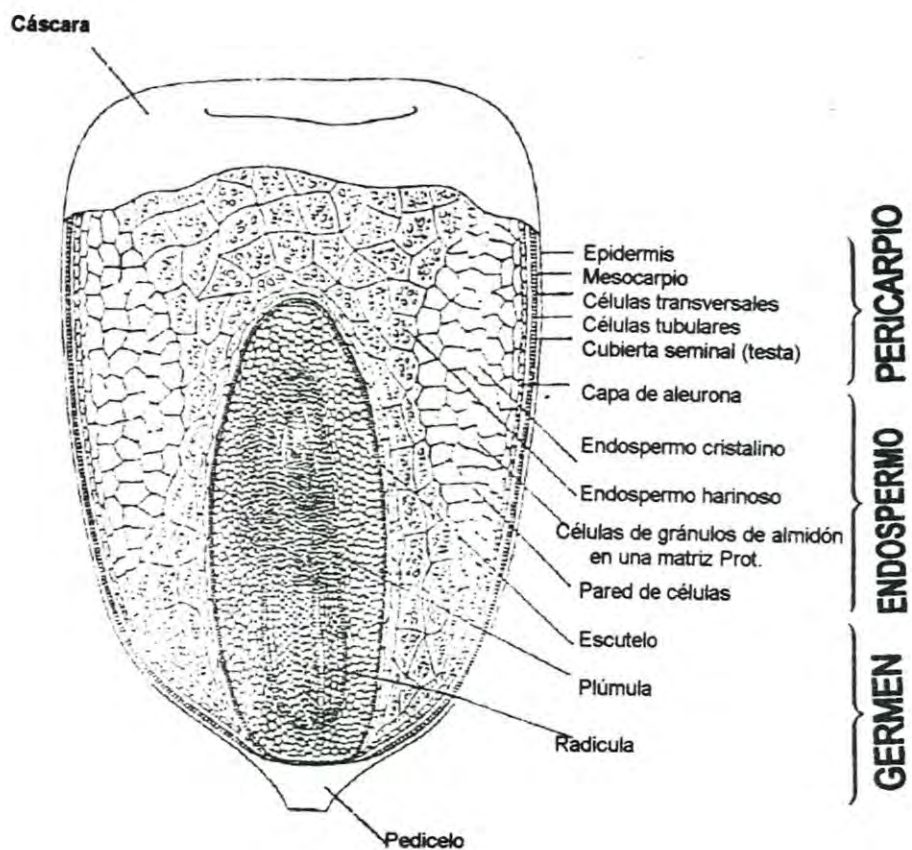


Figura 4. Estructura del grano de maíz: corte longitudinal.

FAO (1993).

(cáscara o salvado), germen (embrión), endospermo y pedicelo o piloriza (tejido inerte en que se une el grano con el olote) (Inglett, 1970).

Pericarpio

Esta compuesto de una capa externa de células de pared gruesa, alargada y petrificada, formando un tejido denso y duro, así como también de células esponjosas, tubulares y transversales debajo de la capa anterior. Finalmente se encuentra un tejido de células gruesas conocido como capas de células de aleurona (Watson y Ramstad, 1987). El pericarpio constituye aproximadamente el 5 % de la distribución ponderal del grano de maíz (FAO, 1993).

Endospermo

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 proteínas y minerales, así como pigmentos que hacen que los granos de ciertas variedades presenten diversos colores (azul, negro o púrpura). El grano de maíz dentado presenta regiones de endospermo harinoso y endospermo córneo, siendo las proporciones variables en el tipo de maíz (Watson y Ramstad, 1987; Bennet, 1950; Christianson, 1963). El endospermo harinoso presenta una apariencia opaca y quebradiza, los gránulos de almidón son de forma esférica y suelta con paredes celulares delgadas, y las matrices proteicas delgadas e incompletas en algunos lugares de la periferia de los gránulos de almidón. En el endospermo córneo las células cercanas a la capa de aleurona son muy pequeñas, empaquetadas en una pared celular densa (Wolf *et al.*, 1969). El endospermo presenta un porcentaje cercano al 83 % del peso del grano (FAO, 1993).

Germen

Esta estructura es considerada como el primer tejido de reserva del grano. Se encuentra formado por un escutelo que ocupa el 90 % del germen y almacena nutrientes que son utilizados durante la germinación, así como también un eje embrionario formado por la plúmula o vástago y la raíz primaria envuelta por la coleorriza (Watson y Ramstad, 1987). El germen equivale al 11 % del peso del grano (FAO, 1993).

Pedicelo

Es la estructura celular por medio de la cual el grano se encuentra unido al olote. Esta compuesto de haces vasculares que terminan en la porción basal del pericarpio, consta de una capa exterior de abscisión, con la probable función de sellar la punta del grano maduro. Además esta estructura es la responsable de la absorción de líquidos del pedicelo al pericarpio. El pedicelo constituye el 0.5 % del peso total del grano (Watson y Ramstad, 1987).

Producción y Consumo

Entre los cultivos de cereales en el mundo, el maíz ocupa el tercer lugar en importancia, sin embargo entre las economías de las naciones en desarrollo, el maíz ocupa el primer lugar en Latinoamérica, África y el tercero después del arroz y el trigo en Asia (FAO, 2001). A nivel mundial este cereal representa el 54 % de las fuentes alimenticias de la población humana (González, 1995), es el más sembrado en cuanto a cereales se refiere, 70 países incluyendo 53 naciones en vías de desarrollo plantan maíz en más de 100 millones de hectáreas; la superficie cultivada ocupa la tercera posición (142,685,295 Ha), con un rendimiento de 4,471 kg/Ha y una producción de 638,043,432 MT (millones de toneladas) de los cuales Estados Unidos de América (EUA), China,

Brasil, México e India son los productores mas importantes (Tabla 1) (FAO, 2003). En México el maíz durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2002-2003 y primavera verano 2003 se obtuvo una producción de 19,321 millones de toneladas de maíz (INEGI, 2003), y se estima un consumo promedio de 23,801 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; INEGI, 1996).

En México, se manufacturan anualmente alrededor de 3.0 millones de toneladas de harina de maíz nixtamalizada, esto equivale, sin contar los productos obtenidos a partir de la masa fresca, a un consumo "per cápita" de harina nixtamalizada de aproximadamente 37 kg/año o el equivalente a 58 kg de tortillas / año, sin embargo, se reporta en varios grupos de gentes un consumo de hasta 129 kg/año, así como, un consumo anual aparente de 209.8 kg per cápita de maíz (Serna-Saldivar, 1996).

Composición y Valor Nutricional

El maíz es una de las fuentes más importantes de energía, proteínas así como de otros nutrimentos para los seres vivos especialmente en países en vías de desarrollo, aunque su composición química difiera por diversos factores como la variedad, localización geográfica y las condiciones de crecimiento (Paredes-López *et al.*, 2000). El maíz presenta un contenido proteico que es bajo, ya que proporciona en promedio el 39 % de proteína que es asimilable así como el 59 % de la energía que ingieren los mexicanos (Morris y López, 2000). La calidad de la proteína de los materiales MCP es similar a la de la leche (Bressani, 1994) y su aprovechamiento con materiales MCP es del 90 %, mientras que con los maíces comunes solo se aprovecha el 39 %.

Tabla 1. Superficie cultivada, producción y rendimiento de maíz normal en el mundo.

<i>País</i>	<i>Superficie cultivada (Ha)</i>	<i>Producción (MT)</i>	<i>Rendimiento (kg/Ha)</i>
Argentina	2,322,857	15,040,000	6,474
Brasil	12,935,200	47,809,300	3,696
China	23,520,000	114,175,000	4,854
Estados Unidos de América	28,789,240	256,904,560	8,923
Francia	1,667,000	11,898,000	7,137
India	7,000,000	14.800.000	2,114
Indonesia	3,354,692	10,910,104	3,252
Italia	1,159,370	8,978,180	7,744
México	7,780,880	19,652,416	2,525
Sudáfrica	3,350,000	9,714,254	2,899
Otros	50,806,056	128,161,618	
Mundial	142,685,295	638,043,432	4,471

FAO (2003).

Carbohidratos

El componente químico principal del grano de maíz es el almidón, al que corresponde hasta el 72-73 % del peso del grano. Otros carbohidratos son azúcares sencillos en forma de glucosa, sacarosa y fructosa (1 al 3 % del grano y se halla esencialmente en el germen). 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, que constituye hasta el 25-30 % del almidón. El polímero amilopectina también consiste de unidades de glucosa, aunque en forma ramificada que posee aproximadamente 40,000 unidades de glucosa y que constituye hasta el 70-75 % del almidón. La composición del almidón está determinada genéticamente (Boyer y Shannon, 1987). El almidón presenta propiedades como: birrefringencia, absorción de agua, gelatinización y retrogradación.

Birrefringencia. Un cuerpo que presenta birrefringencia es aquél que refracta la luz polarizada, debido a que dentro del granulo existe un alto grado de orientación molecular lo cual se refleja al observar los gránulos de almidón al microscopio con luz polarizada, (donde se aprecia una típica cruz conocida como cruz de malta). Los maíces con elevado contenido de amilosa muestran poca cristalinidad y birrefringencia a comparación de los maíces cérosos y normales. El almidón pierde su birrefringencia cuando se encuentra gelatinizado (Seib y Stearns, 1972).

Absorción de agua. La cantidad de agua absorbida por el almidón dependerá del contenido de humedad del medio que lo rodea, hasta alcanzar la humedad de equilibrio (con el medio circundante) y el proceso es reversible cuando el agua es fría; la absorción de agua fría hace que el gránulo presente un hinchamiento incrementando el tamaño de su diámetro hasta un 10 % (Seib y Stearns, 1972).

La absorción de agua caliente está determinada por la fuerza de unión de la estructura del gránulo de almidón, que depende del grado de asociación molecular entre la amilosa y la amilopectina (Leach, 1965). La estructura antes mencionada presenta un límite en su elasticidad y, por ello los gránulos poseen una limitada capacidad de absorber agua caliente con un hinchamiento reversible. Este proceso llega a ser irreversible cuando son rotos los puentes de hidrógeno que unen a las moléculas de la estructura, ya sea por calor, agentes químicos, mecánicos o por combinación de ambos, en presencia de una cantidad suficiente de agua (Rasper, 1980).

Gelatinización. Es la ruptura del orden molecular dentro del gránulo de almidón manifestando cambios en propiedades como hinchamiento granular, fusión del cristal nativo, pérdida de birrefringencia y solubilidad del almidón (Boyer y Shannon, 1987). Cuando una suspensión de almidón se somete a calentamiento en presencia de agua, en las primeras etapas los gránulos se hinchan por la absorción de agua, aunque conservarán aún sus propiedades de birrefringencia; posteriormente se llegará a una temperatura en donde los gránulos se hincharán más rápidamente hasta llegar a un punto en donde algunos presenten hinchamiento irreversible y ya no serán birrefringentes. Si continúa el calentamiento se observará que durante un estrecho intervalo de temperatura, la población completa de los gránulos se gelatinizó. Entre más pequeños sea los gránulos, se gelatinizarán a una menor temperatura (Banks y Greenwood, 1975). Durante el calentamiento, existe una lixiviación de amilosa hacia la periferia del gránulo, a mayor cantidad de amilosa lixiviada, mayor viscosidad de la suspensión, al incrementarse la temperatura se incrementa la viscosidad hasta llegar a un máximo y después disminuye aunque se continúe incrementando la temperatura (Seib y Stearns, 1972).

Retrogradación. Es la formación de un gel rígido que se origina cuando una suspensión de almidón que se sometió a calentamiento y se gelatinizó, es enfriada. Este fenómeno se debe a que la amilosa tiende a formar rápidamente

puentes de hidrógeno entre grupos hidroxilo de moléculas adyacentes (amilosa y amilopectina), por lo que estas van perdiendo su capacidad de hidratación respecto a su situación original, dándose un encogimiento parcial del almidón. La asociación por puentes de hidrógeno forma agregados que al alcanzar cierto tamaño precipitan como cristales de almidón (Seib y Stearns, 1972).

Proteínas

Después del almidón, las proteínas constituyen el siguiente componente químico del grano por orden de importancia. En las variedades comunes, el contenido de proteínas puede oscilar entre el 8 y el 11 % del peso del grano, y en su mayor parte se encuentran en el endospermo y germen. Las proteínas de los granos del maíz han sido estudiadas ampliamente, y están formadas por lo menos por cinco fracciones distintas (Landry y Moureaux 1970; 1982). El maíz contiene tres grupos de proteínas: (a) las proteínas de almacenamiento, las cuales constituyen aminoácidos de reserva depositados en grano; (b) las enzimas involucradas en el metabolismo; y (c) las proteínas estructurales como las que forman los ribosomas, cromosomas y membranas. Las proteínas predominantes en el maíz son una familia de prolaminas almacenadas solubles en alcohol llamadas zeinas, las cuales se acumulan en cuerpos proteicos del endospermo del grano durante su desarrollo (Lending y Larkins, 1989).

En el endospermo harinoso se encuentra un reducido porcentaje de glutelina, mientras que el endospermo cristalino se presenta un alto porcentaje de glutelina, formando matrices proteicas densas que envuelven a los gránulos de almidón, los cuales son pequeños y más internamente son mayores y variables en tamaño y forma, su apariencia translúcida es debido a que los espacios intergranulares están cubiertos por cuerpos de zeina. Otro aspecto de importancia es que se presenta alto contenido de leucina, pero bajo contenido de isoleucina, este desbalance provoca que el valor biológico de la proteína

disminuya (Paredes-López *et al.*, 2000). 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 y Ramstad, 1987).

Aceites y ácidos grasos

El aceite del grano de maíz está fundamentalmente en el germen y viene determinado genéticamente, con valores que varían del 3 al 8 %. El aceite de maíz tiene un bajo nivel de ácidos grasos saturados: ácido palmítico y esteárico, con valores medios del 11 % y el 2 %, respectivamente. En cambio, contiene niveles relativamente elevados de ácidos grasos polinsaturados, fundamentalmente ácido linoleico, con un valor medio cercano al 24 %, a ese respecto, quienes consumen maíz desgerminado ingieren menos aceite y ácidos grasos que quienes consumen el grano integral (FAO, 1993). Además, se encuentran fosfolípidos (1.5 %), esteroides, tocoferoles (0.16 a 0.42 mg/g) y carotenoides (1.6 %) (Watson y Ramstad, 1987).

Fibra dietética

Después de los carbohidratos (principalmente almidón), las proteínas y las grasas, la fibra dietética es el componente químico del maíz que se halla en cantidades mayores (12-14 %). Los carbohidratos complejos del grano de maíz se encuentran en el pericarpio y el pedicelo, aunque también en las paredes celulares del endospermo y, en menor medida, en las del germen (FAO, 1993), el pericarpio de maíz está formado por un 75 % de hemicelulosa, un 25 % de celulosa y 0.1 % de lignina, en peso seco (Sandstead *et al.*, 1978). El contenido de fibra dietética de los granos descascarados será evidentemente menor que el de los granos integrales.

Minerales

La concentración de minerales en el grano de maíz es aproximadamente de 1.4 %. Los factores ambientales influyen probablemente en dicho contenido. El germen es relativamente rico en minerales, con un valor medio del 11 %, frente a menos del 1 % en el endospermo. Como sucede con la mayoría de los granos de cereales, el maíz tiene un bajo contenido de calcio (48.3 ± 12.3 mg/100 g) y de oligoelementos (FAO, 1993; Bressani *et al.*, 1989).

Vitaminas

El grano de maíz contiene dos vitaminas solubles en lípidos, la provitamina A, o carotenoide, y la vitamina E. La mayoría de los carotenoides se encuentran en el endospermo cristalino del grano y únicamente pequeñas cantidades en el germen (FAO, 1993). De acuerdo con estudios recientes, si se mejora la calidad proteínica del maíz aumenta la transformación de beta-caroteno en vitamina A. La otra vitamina liposoluble, la vitamina E, que es objeto de cierta regulación genética, se halla principalmente en el germen (FAO, 1993). Las vitaminas que son solubles en agua se encuentran sobre todo en la capa de aleurona del grano de maíz, y en menor medida en el germen y el endospermo. Esta distribución tiene importancia durante el proceso ya que se dan pérdidas considerables de vitaminas. El contenido de niacina (ácido nicotínico) presenta valores medios de ingesta de aproximadamente 20 µg/g y su bajo consumo esta relacionada con problemas de pelagra (Christianson *et al.*, 1968). Otras vitaminas como la colina, el ácido fólico y el ácido pantoténico se encuentran en concentraciones pequeñísimas (Yen *et al.*, 1976).

Maíz de Calidad Proteínica (MCP)

Durante la década de los 60's y 70's, en diversos países se realizaron estudios para inducir el carácter que presentaba el maíz opaco (40-45 % más de

lisina y 35-40 % más de triptófano, aminoácidos esenciales) (Tabla 2), en México se convirtieron líneas progenitoras de híbridos y variedades (de polinización libre) a este carácter (Mertz *et al.*, 1964; Gerón *et al.*, 1978). Sin embargo, a un alto valor nutritivo de estos maíces se obtenían características indeseables como: grano con textura suave, bajo peso y poca resistencia a enfermedades y plagas de almacén. Estos problemas representaron una limitante para el avance de estas investigaciones (INIFAP, 2001). Mediante técnicas de mejoramiento tradicional se incorporaron genes (modificadores de la textura del endospermo) al maíz opaco, estos genes confieren una textura del grano mas dura dando asi la apariencia de un maíz normal, al maíz con esta características se le llama maíz con alta calidad de proteína (MCP, en inglés Quality Protein Maize o por sus ciclas QPM) (Vasal, 1994). En 1996 el Centro de Investigación y Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT) comenzó la promoción de estos materiales en México y en otros países para obtener asi híbridos y variedades con líneas sobresalientes. CIMMYT en cooperación con el Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), que tiene como principal objetivo avances en el sistema productivo mediante el desarrollo de materiales genéticos a través de los procesos tradicionales para el mejoramiento de la semilla. La V-537 C obtenida por INIFAP que presenta un índice de calidad (parámetro que relaciona el contenido de triptófano y de proteína) 53 % mayor al maíz normal (Tabla 3).

Procesos de Elaboración de Tortilla de Maíz

Esta tecnología que ha sido transmitida a través de generaciones en Mesoamerica, involucra el cocimiento térmico-alcalino del grano de maíz, proceso denominado nixtamalización (del Nahuatl nixtli=cenizas y tamalli=masa). El producto resultante era llamado tlaxcalli por los aztecas y posteriormente se empleo la palabra tortilla (diminutivo de torta) por los españoles (Serna-Saldivar *et al.*, 1990; Clavijero, 1979).

Tabla 2. Perfil de aminoácidos del grano de maíz blanco dentado y maíz de calidad proteica.

Aminoácido (g/16g de N)	Maíz Blanco dentado	Maíz MCP ¹	Diferencia
Alanina	8.2	6.8	-1.4
Arginina	4.2	7.5	3.3
Ácido Aspartico	6.2	7.8	0.4
Cisterna	1.4	2.3	0.9
Ácido Glutámico	19.4	17.7	-1.7
Glicina	3.7	5.5	1.8
Histidina	3.3	4.7	1.4
Isoleucina	3.6	3.6	0
Leucina	13.4	9.6	3.8
Lisina	2.7	4.3	1.6
Metionina	2.2	2.1	-0.1
Fenilalanina	5.4	4.7	-0.7
Prolina	7.8	8.3	0.5
Serina	5.3	5.5	0.2
Treonina	3.8	4.5	0.7
Triptofano	0.56	1.01	0.45
Tirosina	3.3	4.1	0.8
Valina	5.0	5.7	0.7

¹ Maíz de Calidad proteica (MCP) V-537C

Ortega *et al.* (1986).

Tabla 3 . Composición química del grano de maíz blanco dentado y de calidad proteica.

Característica	Maíz Blanco dentado ¹	Maíz MCP (V-537C) ²
Proteínas (%)	10.3	10.7 ± 0.53
Triptofano(%)	0.067 ³	0.103 ³
Lisina (%)	0.290 ³	0.427 ³
Lípidos (%)	4.8	6.1 ± 0.01
Cenizas (%)	1.4	1.6 ± 0.12
Carbohidratos (%)	73.5	81.6 ± 0.56

¹ Paredes-López *et al.* (2000).

² Milan-Carrillo (2003).

³ INIFAP (2001).

Tradicional

Illescas (1943), menciona que en este proceso se mezcla una parte de maíz con dos partes de una solución de cal (aproximadamente el 1%). La mezcla se calienta a 80 °C durante un lapso de 20 a 45 minutos y luego se deja reposar toda la noche. Al día siguiente, se decanta el líquido cocido y el maíz, denominado entonces nixtamal, se lava con agua (para eliminar las cubiertas seminales, el pedicelo, la cal sobrante y las impurezas del grano. El maíz se transforma a masa moliéndolo varias veces con una piedra plana hasta que las partículas gruesas alcanzaran el tamaño de partícula requerido, y finalmente para elaborar la tortilla, se toman unos 50 g de masa y se aplanan, cociéndolo posteriormente por ambos lados en una plancha caliente o placa de arcilla (FAO, 1993) (Fig .5).

Industrial

Este proceso se basa en el método utilizado tradicionalmente en las zonas rurales. Su cocción en agua con cal para obtener el nixtamal se da en lotes o mediante un procedimiento de elaboración continua. Tras su cocción y macerado, el maíz tratado en agua de cal se lava con agua a presión o pulverización y se tritura en molinos de martillos hasta que forme una masa que se lleva a un secador y se convierte en harina. Dicha harina, formada por partículas de distintos tamaños, se pasa por un tamiz que separa las partículas gruesas de las finas. Las partículas gruesas regresan al molino para ser trituradas otra vez y las finas, que constituyen el producto acabado, se envían a las instalaciones de envasado, donde se empacan en bolsas de papel reforzado (Fig. 6).

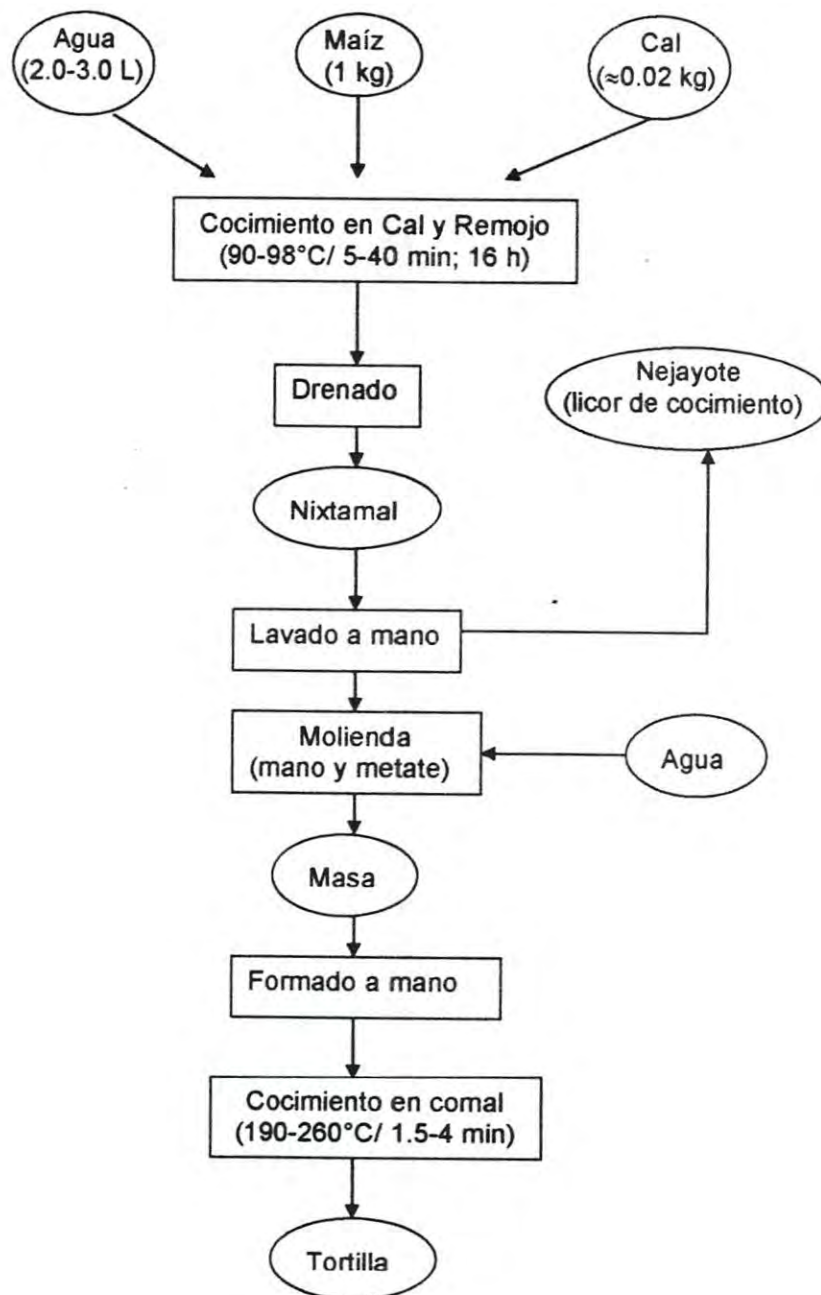


Figura 5. Proceso tradicional utilizado para elaborar tortillas.

Serna-Saldivar (1996).

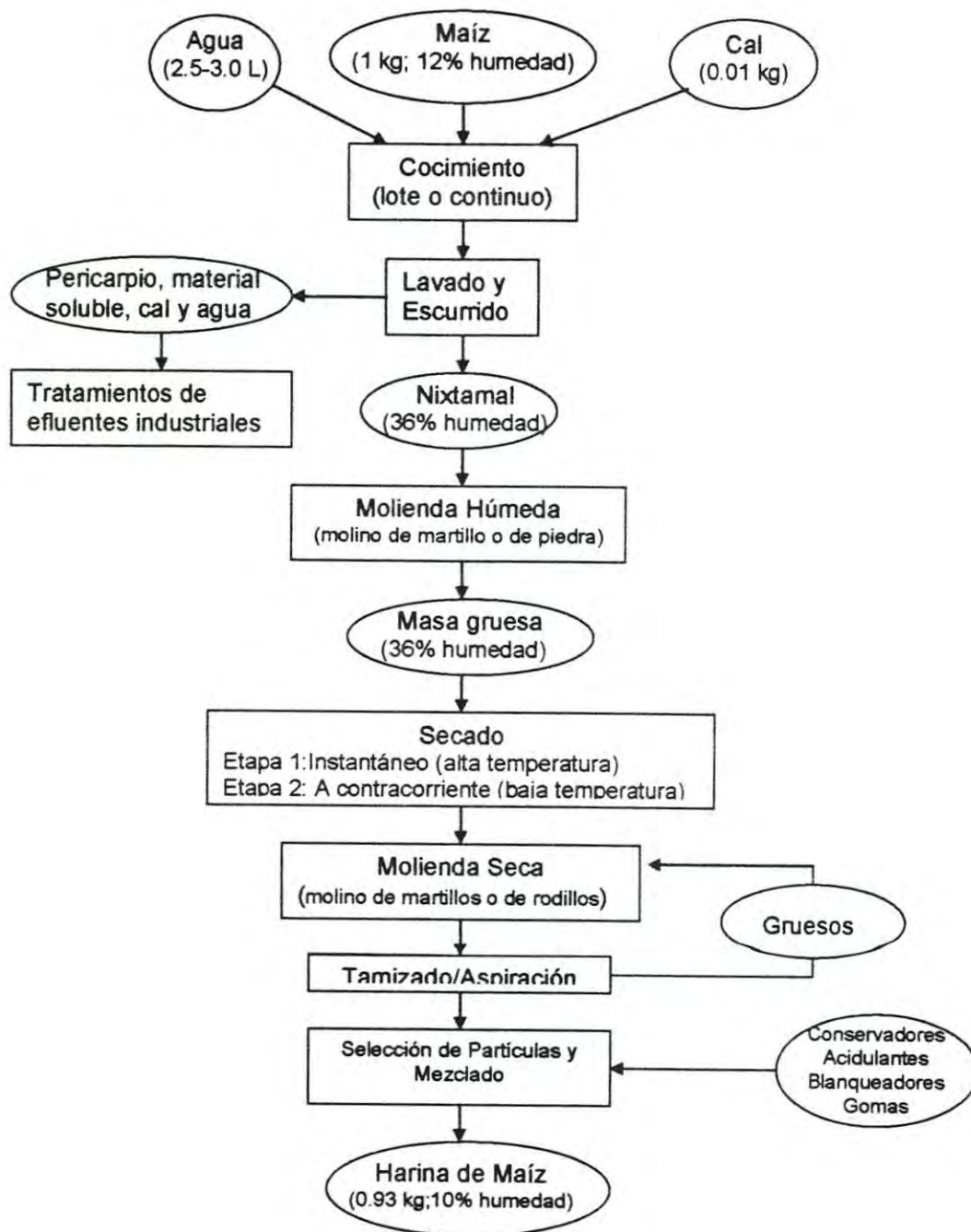


Figura 6. Proceso Industrial de producción de harinas nixtamalizadas de maíz.

Serna-Saldivar (1996).

Una instalación completa de tratamiento debe tener maquinaria para realizar las siguientes operaciones: cocción en agua de cal, molienda, secado y cernido, así como una capacidad de producción diaria de 30 a 80 toneladas de harina. Estas cifras son el mínimo y el máximo; para aumentar su capacidad de producción, una empresa comercial debe instalar varias unidades paralelas. El rendimiento industrial de la harina de maíz por cocción en agua de cal fluctúa entre el 86 y el 95 %, de acuerdo al tipo de maíz, localidad de los granos enteros y las condiciones en que se realiza el tratamiento con cal. Los rendimientos industriales son más elevados que en el medio rural y en condiciones semi-industriales, atribuidos a la uniformidad del proceso.

Control de calidad. En México todas las harinas de maíz deben fabricarse conforme a las instrucciones dictadas por el Departamento de Normas y Reglamentos (NMX-F-046-S-1980. SECOFI, 1980; NOM-147-SSA1-1996. PROY-NOM-187-SSA1-2001. SSA, 1996 y 2001). Dentro de los factores importantes de calidad de las harinas de maíz nixtamalizado tenemos: el índice de material soluble (indica el grado de cocción en la elaboración de la harina), la capacidad de retención de agua (en relación con la gelatinización), la densidad (tamaño medio de partícula), el pH (cantidad de alcali usado durante la nixtamalización) y el tamaño medio de partícula (hace referencia a la molienda y cribado utilizado en el proceso).

Otro de los aspectos de control de calidad más utilizados es la medición del color, que se encarga de la medición del espectro de luz visible (390 a 760nm) en donde los ojos perciben el color. La escala para su medición se basa en que el ojo humano cuenta con dos tipos de células sensitivas en la retina, en barra (sensitivas a la luz y a la oscuridad) y en cono (sensitivas al color). Dentro de las células sensitivas en cono existen tres clases dentro de la retina: sensitiva a la luz roja, verde y azul. Para optimizar la medición y registro del color se utilizó la escala triestímulo (XYZ), en donde uno de los sistemas que se

basa en este principio es el Hunter Lab solid en donde L representa la luminosidad u oscuridad, $+a$ la tendencia al rojo, $-a$ hacia el verde, $+b$ hacia el amarillo, y $-b$ hacia el azul (Fig. 7). En la investigación es deseable la medición del color del producto durante su almacenamiento, procesamiento, maduración y cambios en su estructura física (Francis, 1995).

La textura es un parámetro de calidad de las en harinas, masas y tortillas, puede ser expresada en términos descriptivos. Estos incluyen dureza, firmeza, adhesividad y algunos otros. Los parámetros físicos incluyen términos como elasticidad, plasticidad y viscosidad. Ambos tipos de términos previamente mencionados, no definen de manera satisfactoria la palabra textura (Mohsenin, 1986). Textura es definido como la superficie visual o táctil de las partículas de un cuerpo o sustancia (Anonymus, 1985). La ciencia de los alimentos al definir textura incluye las características reológicas, especialmente durante la mordida y masticación (Lusas, 1998). Reología es definida como la ciencia de la deformación y flujo de materia, y es determinada cuando se somete a una reacción de fuerza o sistema de fuerzas (Darby, 1976).

Mohsenin (1986), menciona que el método actual de evaluación de las características texturales puede ser clasificada en: (a) evaluación sensorial o subjetiva y (b) mediciones objetivas o instrumentales. Szczesniak (1996) divide los métodos instrumentales en (1) fundamentales o reológicas, (2) empíricas, y (3) mediciones imitativas. Las propiedades reológicas pueden ser expresadas: a) empíricamente, en términos de función de materiales con componentes específicos relacionados a la fuerza y la tasa de esfuerzo tensor, y b) en términos de ecuaciones reológicas de estado con una relación analítica entre las fuerzas completas y el esfuerzo tensor (Darby, 1976).

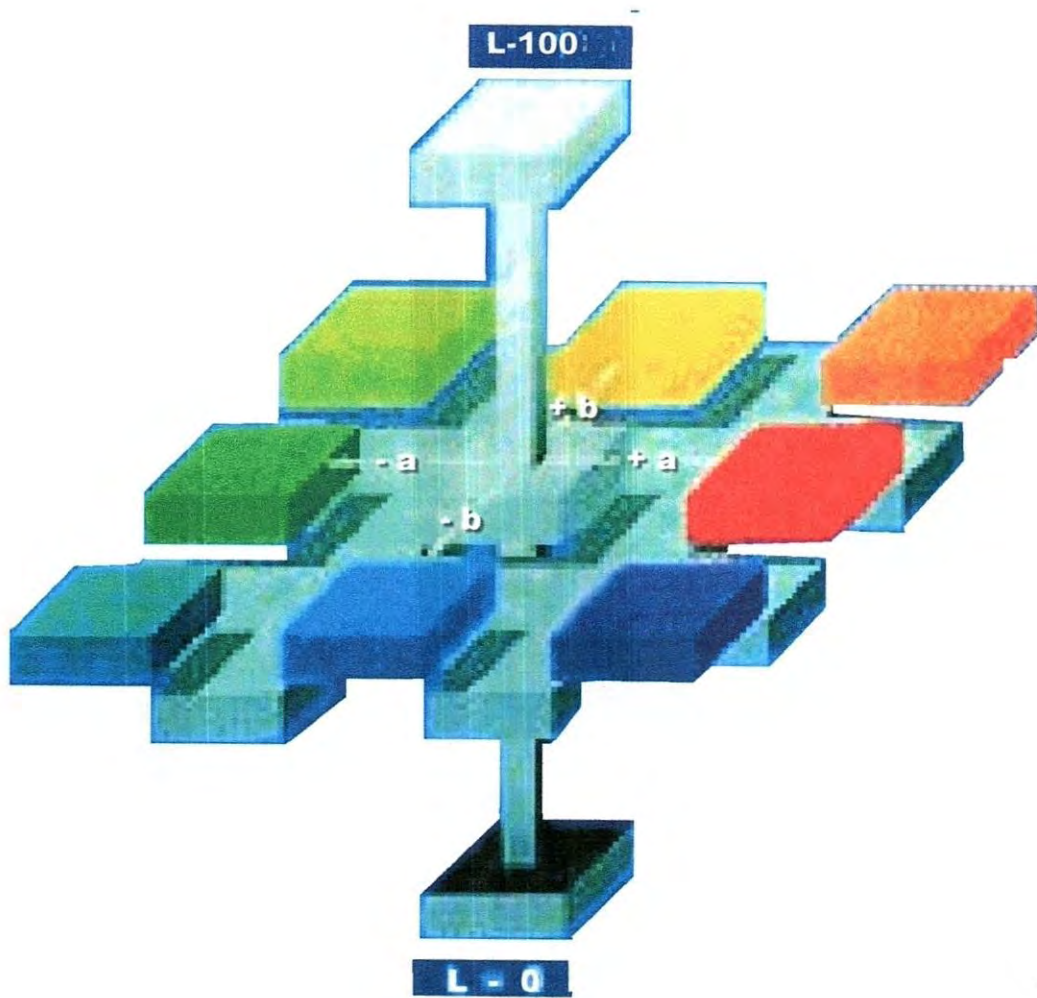


Figura 7. Representación de los valores de L, a y b en los colores sólidos Judd-Hunter Lab.

Francis (1995).

El factor de compresión tensión se define como la relación de fuerzas de compresión y tensión obtenidas con el texturometro instron en una prueba de compresión / tensión (Ramírez-Wong, 1989). Ramírez-Wong *et al.* (1993), menciona la determinación de la prueba de compresión-tensión en masa utilizando dos platos metálicos, uno fijo y otro sujeto al cabezal del texturometro con movimiento ascendente o descendente a una velocidad constante de 0.5 cm/min. Con la masa se forman esferas con un peso 5 ± 0.05 g y se moldean en un cilindro plástico (31mm de diámetro y 6mm de alto). La masa moldeada se coloca entre los dos platos, para comenzar su determinación. La fuerza de compresión se midió al bajar el cabezal hasta existir una distancia entre los platos de 2 mm (simulando el grosor de una tortilla) y la fuerza de tensión fue medida al subir el cabezal nuevamente y separarse de la muestra para retornar a su posición inicial. La curva que obtuvo muestra un comportamiento ascendente para la fuerza de compresión y descendente para la tensión, a través de los gráficos obtenidos se determino la dureza (fuerza máxima de compresión, kg f o en Pa), adhesividad (fuerza máxima de tensión, N·m) y la relación máxima de compresión-tensión (Fig. 8). Por lo que masas con una alta relación de compresión-tensión son duras, y muestras con baja relación en compresión-tensión son pegajosas. Las interacciones del tiempo de cocción y la molienda, así como la molienda y la humedad, afectan el factor compresión-tensión en masas frescas.

Bressani (1990) menciona que para la preparación de tortillas de maíz de buena calidad a partir de harinas nixtamalizadas se requiere que la distribución del tamaño de partícula sea uniforme y en cantidades iguales para mallas de número 60,70 y 80 (250, 210, 177 micrones), que el pH sea aproximadamente 7.2, el índice de capacidad de retención de agua de 1.3 g de agua / g de harina (a 70 °C) y el color sea blanco o amarillo pálido.

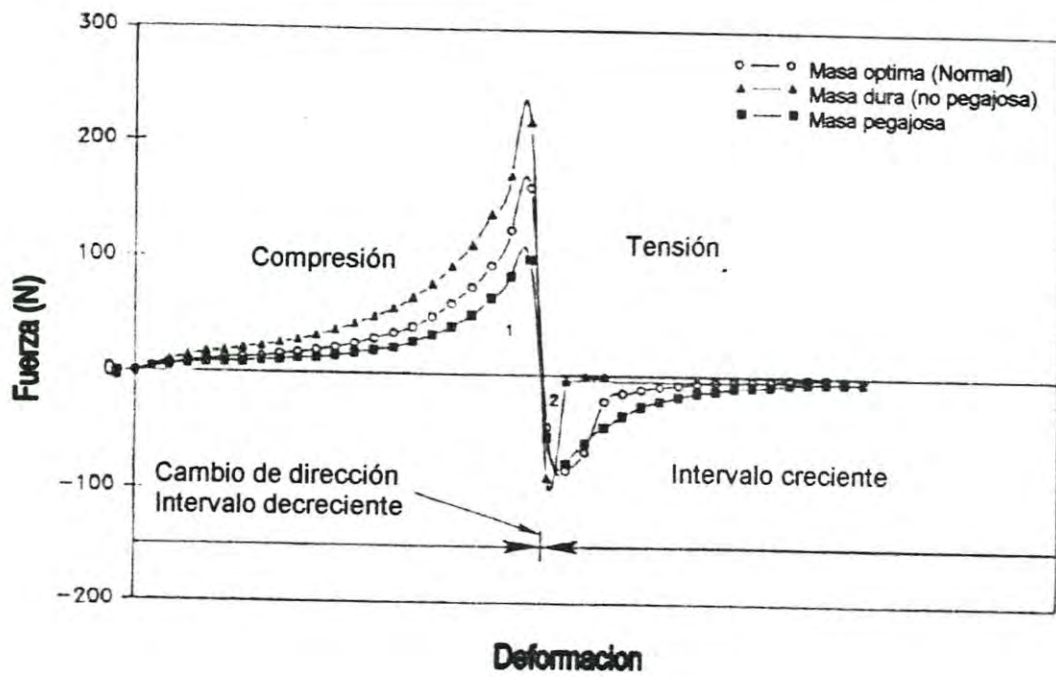


Figura 8. Curva típica de fuerza distancia obtenida en el Instron en la prueba textural de masa fresca, dura, óptima y masa pegajosa.

Ramirez-Wong (1989).

La nixtamalización se ha utilizado a lo largo de generaciones en Mesoamérica, juega un papel crítico en el aumento del valor nutrimental y es base de la elaboración de diversos productos alimenticios (Paredes López y Saharópulos-Paredes, 1983; Bressani, 1990; Serna-Saldivar *et al.*, 1990), como nachos, tostadas, tamales, atoles y tortillas entre otros (Fig. 9). La producción de harinas de maíz nixtamalizado se ha incrementado de manera significativa durante los últimos 10 años, consolidando así este sector industrial en el mercado nacional, centroamericano y estadounidense (SAGAR 2000). Debido a que las ventas en este sector han presentado un incremento anual alrededor del 10 %, se considera que para los siguientes años los productos basados en maíz se pueden expandir a todo el mundo (Rooney y Suhendro, 1999).

Guerra (2002), menciona que en el procesamiento del MCP V-537 C por el método tradicional, en el que se presentó un mayor grado de absorción de agua, mayor tiempo de cocción y mayor uso de agua en el lavado (a diferencia del maíz criollo), con la que se obtuvo una mayor proporción de masa y mayor número de tortillas, así como una aceptación de la tortilla elaborada a uno y dos días.

Cambios durante la Nixtamalización

Durante la nixtamalización y etapas posteriores a esta, se presentan algunas modificaciones en su contenido nutrimental ocasionado por el efecto de contenido de humedad, calor, hidróxido de calcio, tamaño de partícula, secado y horneado. Los cambios que se dan durante la nixtamalización son debidas a las perdidas materiales del grano y a las perdidas químicas, originadas de la destrucción de algunos elementos nutritivos y de la transformación química de otros (FAO, 1993).

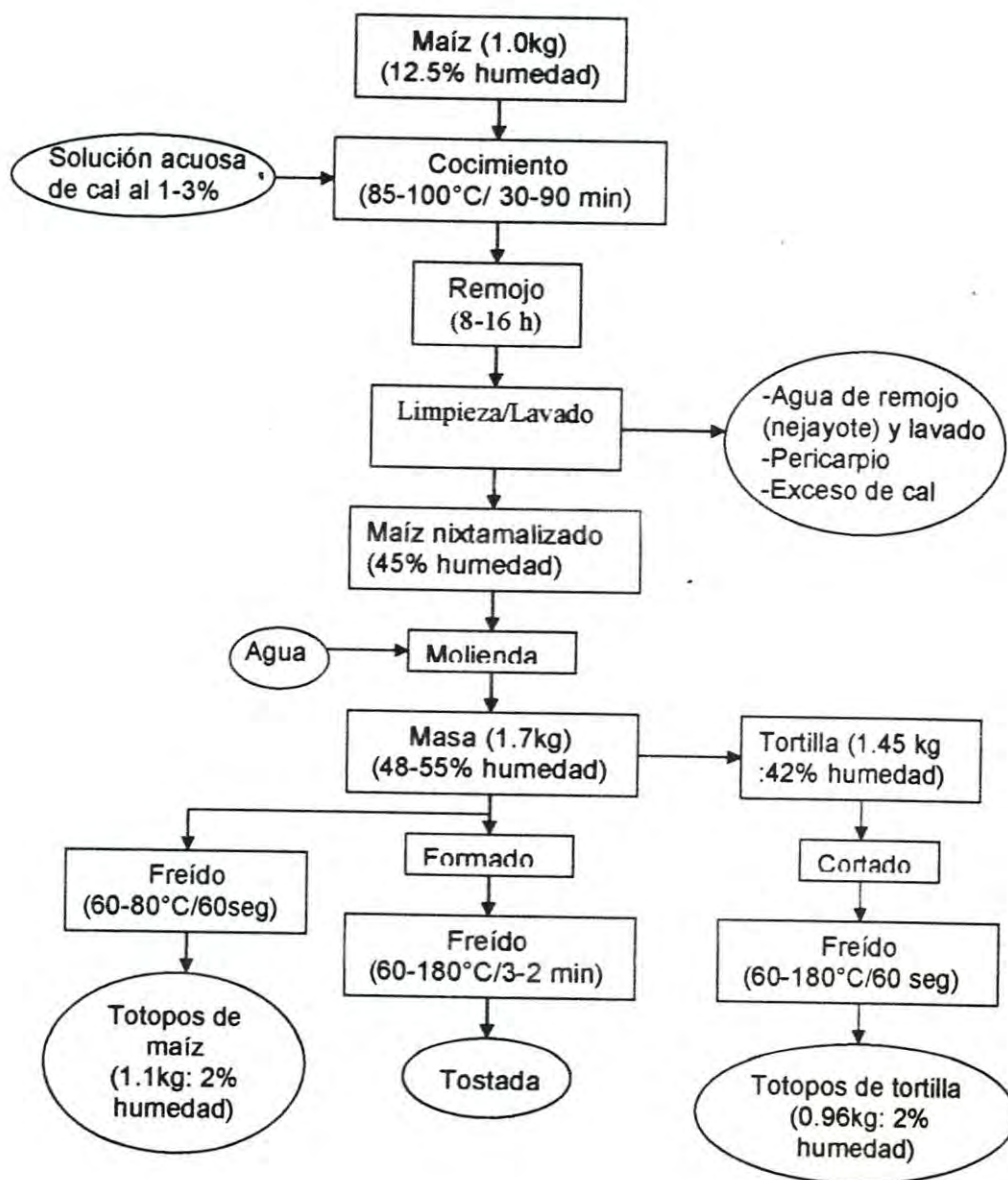


Figura 9. Proceso tradicional de Nixtamalización para la producción de derivados de la masa y tortilla.

Paredes López *et al.* (2000).

Cambios estructurales

Paredes-López y Saharópulos-Paredes (1982), observaron la superficie exterior de maíz tratado con cal a través de microscopia electrónica de barrido, mostrando un deterioro estructural, en la capa de aleurona y algunos estratos del pericarpio se conservaban, mientras que el germen permanecía sujeto al endospermo.

El hidróxido de Calcio debilita las paredes celulares del grano, con esto facilita el desprendimiento del pericarpio, además solubiliza la pared celular del endospermo periférico. Otro efecto es el hinchamiento, así como la destrucción parcial de los gránulos de almidón y se modifica la apariencia de los cuerpos proteicos. La masa obtenida presenta fragmentos de germen, pericarpio, aleurona y endospermo, así como almidón libre y lípidos disueltos (Gómez *et al.*, 1989).

Almidón. En cuanto a los cambios que se dan en el almidón, los gránulos se hinchan durante la cocción y el remojo a pesar de encontrarse severamente restringidos por la matriz proteica y la pared celular. Por lo que solo una pequeña porción de los gránulos de almidón se gelatinizan durante la cocción alcalina. En la molienda y el horneado se da un mayor incremento de la susceptibilidad del almidón al ataque enzimático (glucoamilasas) a diferencia del incremento discreto que se da durante la cocción alcalina (Serna-Saldivar *et al.*, 1990).

Robles *et al.* (1988) mencionan que el proceso de cocción alcalina retarda la gelatinización del almidón debido a la interacción que se presenta entre el Ca^{++} con el almidón (principalmente amilosa). Además reportan que un nixtamal que se sobrecoce tiende a absorber más agua, esto probablemente debido a que se da un mayor grado de gelatinización, por lo que al elaborar

masa con este nixtamal se presentan propiedades de pegajosidad/adhesividad indeseable en la producción de tortilla, ya que esta pierde flexibilidad o textura de manera mas rápida debido al fenómeno de retrogradación del almidón.

Durante el proceso de molienda se libera al almidón del endospermo y se reduce aún más su cristalinidad, en la cocción de la masa para la producción de tortilla es reducida nuevamente y en forma drástica la cristalinidad del almidón, en el proceso de freído (para elaboración de totopos) causa la pérdida final de la cristalinidad, durante el enfriamiento se da la retrogradación del almidón formando a su vez complejos amilosa-lipidos (Serna-Saldivar *et al.*, 1990; Gómez *et al.*, 1992; McDonough *et al.*, 1993).

Proteína. Bresani (1958) menciona que durante el proceso tradicional de transformación de grano a masa se pierde alrededor del 10 % de nitrógeno. Ortega *et al.* (1986), realizaron la comparación del contenido de aminoácidos lisina y triptófano entre el MCP y el maíz normal durante el procesamiento maíz-tortilla, en donde se obtuvo que el MCP presentó 80 % más de triptófano y 64 % mas de lisina que el maíz normal. Sin embargo el procesamiento reduce los niveles de triptófano en un 15 % en MCP y 1 % en maíz normal.

Lípidos. Se presenta una reducción de los lípidos presentes en el grano de maíz no mayor al 4 % a la obtención de la tortilla, esto puede ser ocasionado por la perdida parcial o total del germen en donde se localiza la mayoría de lípidos del grano, ya que aparentemente el proceso de nixtamalización no altera la distribución de los ácidos presentes en el maíz pero si afecta la saponificación de los triacilgliceridos (Bresani *et al.*, 1990; Serna-Saldivar *et al.*, 1990).

Vitaminas. En el contenido de vitaminas, existe una pérdida de caroteno (alrededor del 20 %), de tiamina (reduce un 58 %), la riboflavina (64 %) y niacina (62 %), esta última es de interés ya que no se presenta de manera disponible en el maíz pero durante la cocción alcalina es liberada como ácido nicotínico

(componente de la niacina) y así ser aprovechado (Watson, 1987; Bressani *et al.*, 1997). Bressani (1990), menciona que los productos de maíz nixtamalizado aportan del 39-56 % de niacina, del 36-62 % de tiamina y el 19-36 % de riboflavina de los requerimientos mínimos.

Minerales. El contenido de calcio del maíz puede ser incrementado hasta un 98.3 %, al ser nixtamalizado, este contenido varía debido a las temperaturas utilizadas durante la cocción, la cal removida durante el lavado del grano cocido, así como, la cal añadida antes de la cocción. El calcio de las tortillas es importante en la dieta ya que se proveen de un 26-28 % del calcio ingerido per cápita en México. Por lo que la nixtamalización reduce los problemas asociados a la deficiencia de este mineral (Serna-Saldivar *et al.*, 1991a,b; Bressani, 1990; Paredes-López *et al.*, 2000). Además, la tortilla puede aportar de un 32-62 % de los requerimientos mínimos de hierro y a incrementar la absorción de varios minerales (Bressani, 1990).

Procesos Alternos en la Elaboración de Harina de Maíz Nixtamalizada

Los procesos continuos y discontinuos (por lotes o batch) (Montemayor y Rubio, 1983) describen como la mezcla de maíz, cal y agua es colocada en una banda en espiral en una atmósfera de vapor, de tal manera que el grano es cocido a medida que es transportado. Posteriormente el grano es lavado para remover parte del pericarpio y exceso de cal, secado y molido. Molina *et al.* (1977) reporta el uso de tambores dobles rotatorios calentados por vapor en donde se introduce una mezcla de maíz con agua la que es cocida y secada en un doble tambor rotatorio respectivamente. Mediante el uso de estos métodos se reducen la pérdida de sólidos aunque el gasto de energía es alto.

El método con cámara de vapor (Mendoza, 1975). Utiliza temperaturas en el rango de 80-120 °C. El cocimiento alcalino de harina de maíz con vapor de agua se llevó a cabo dentro de una cámara con ventilador en la parte inferior para homogeneizar tanto el aire como la harina de maíz previamente mezclada con cal, la temperatura se eleva gradualmente hasta acercarse al punto de ebullición, de esta manera se lleva a cabo el cocimiento. Posteriormente, la harina se transfiere a una cámara de enfriamiento y finalmente es molida.

En el proceso de cocción con microondas, (Martínez-Bustos *et al.*, 1996b). Se colocó el maíz con agua e hidróxido de calcio y se coció en el horno de microondas, se enfrió hasta 28 °C y se secó en un horno con circulación de aire a 45-50 °C, posteriormente se molió en un molino de martillos obteniéndose la harina. El uso de este método nos indica un uso potencial de esta energía para producir harina instantánea para tortillas, sin embargo, el costo es alto.

El proceso de cocción dieléctrica (HICD), fue aplicado por Gaytán *et al.* (1997). El maíz se macera (remoja) en una suspensión de agua (50 % en base al peso del maíz) sin o con la adición de cal (0.1 %) y enseguida se le aplicó el tratamiento dieléctrico dentro de una celda de nylamide y dos electrodos de Cu-Ni, conectados a la corriente directa. Posteriormente el maíz fue molido y deshidratado en estufa de circulación de aire caliente para obtener la harina. Las harinas instantáneas obtenidas por este método presentan un alto potencial para producir frituras de buenas características funcionales con ahorros substanciales de agua, tiempo de procesamiento y mayores rendimientos debido al uso integral del grano de maíz.

La disminución en un 40 % del tiempo de cocción se obtuvo con el remojo del grano antes de la cocción en una solución de cal (Morad *et al.*, 1986), con la cocción aumentan las pérdidas de materia seca, la absorción de agua, el contenido de calcio y el almidón sensible a las enzimas. Otro método es el uso de la micronización para producir harinas de sorgo y de maíz ha sido analizado

por diversos autores (Jonson *et al.*, 1980), este método consiste en ~~un~~ la producción de un calentamiento interno rápido, que cuece el producto del interior hacia el exterior. Este método es más rápido y económico que el método tradicional.

Un procedimiento de producción de harina instantánea para tortillas mediante secado en tambor en una fábrica experimental (Molina *et al.*, 1977); para esto mezclaron harina de maíz con agua, la masa se paso por un secador de doble tambor calentado con vapor. El procedimiento produjo una harina instantánea con características fisicoquímicas y organolépticas idénticas a las de la muestra de referencia elaborada de acuerdo con el método tradicional, pero que diferían de las de un producto comercial.

Harina instantánea para tortillas, aprovechando el calor generado durante la molienda de una mezcla de maíz y cal bajo condiciones controladas de impacto, humedad y temperatura (Sterner y Zone, 1984). Las tortillas obtenidas fueron de buenas características, con una mayor eficiencia del proceso en el consumo y remoción de agua con menor pérdida de sólidos.

Proceso de cocimiento de maíz en seco para la obtención de harina de masa deshidratada (Villalba, 1989). En este proceso el maíz se acondicionó a 30 % de humedad con una solución alcalina, y posteriormente fueron cocidos en seco con aire caliente. El grano cocido, que presentó aproximadamente un 10 % de humedad, se molió en molino de martillos y se obtuvo la harina instantánea.

La patente de Estados Unidos de Norteamérica No. 2,5584,893 (Rooney and Millares, 1952), fue el método más comúnmente empleado como proceso alternativo para la elaboración de harina para tortillas, el cual usa ollas de cocimiento agua, cal y maíz. El tiempo de cocimiento es de 30 a 40 min. y reposo de 1 a 6 h. El nejayote es removido, el nixtamal es lavado El material

resultante es secado (secador tipo flash), molido y cribado controlando la distribución del tamaño de partícula. Este método ha sido remplazado por aquellos en donde se maneja un mayor volumen de producción.

Patentes

La patente de Estados Unidos de Norteamérica No. 2,704,257 (Diez de Sollano y Berriozabal, 1955). Presenta un método para producción de harina para tortillas, el cual incluye un mejoramiento del proceso tradicional de nixtamalización transformando directamente el nixtamal en una harina deshidratada mediante una etapa simple de molienda y secado, sin embargo, las etapas de cocimiento y reposo tradicionales continúan siendo realizados previos a las etapas de secado y molienda de nixtamal.

La patente Mexicana No. 125,285 (Celorio, 1972) describe un proceso y equipo diferente para la elaboración de harina de maíz, usando un proceso vía seca en el cual una harina de maíz con una cierta cantidad de cal es calentada en una cámara. Sin embargo, este proceso, produce pobres resultados en relación con la calidad de la harina (falta de homogeneidad durante el proceso de nixtamalización).

La patente de Estados Unidos de Norteamérica No. 4,513,018 (Rubio, 1985) muestra un método continuo para la producción de harina de maíz apropiada para la elaboración de tortillas, taco "shells", frituras y productos similares, el cual usa un proceso modificado de nixtamalización que involucra un pré-cocimiento de los granos de maíz en presencia de cal dentro de un tanque provisto de un tornillo transportador. Con este proceso se obtuvieron harinas de buenas características y se consideró más eficiente que el tradicional, debido a que reduce el uso de agua, costos, dificultades en la remoción del agua y pérdida de sólidos.

Con los anteriores métodos y patentes del proceso de nixtamalización, se logra disminuir el tiempo de procesamiento, el contenido de agua y cal, sin embargo, la calidad de los productos obtenidos aún no han sido optimizados. Pese a todas las bondades de estos métodos, las tortillas de mayor aceptación siguen siendo las elaboradas con el proceso tradicional, el cual con el paso del tiempo ha ido incorporando equipos que hacen más eficiente el proceso.

Extrusión

La palabra extrudir proviene del latín "extrudere" que significa empujar o hacer presión hacia fuera, se ha venido empleando desde finales del siglo XIX en procesamiento de los alimentos para consumo humano y animal, debido en parte a la versatilidad de la tecnología de extrusión que es capaz de producir, de manera económica, una amplia gama de productos (Enríquez, 1984). 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 a cabo funciones de transporte, mezclado, orientación y formado del material a presión y temperatura controladas (Harper, 1989).

Los extrusores se pueden categorizar en tres tipos: pistón, rodillos y tornillos; (a) los extrusores de pistón tienen la función principal de dar forma a un material determinado que es depositado de manera precisa (reellenos de confitería) mediante un pistón o batería de pistones; (b) los extrusores de rodillos son también utilizados para dar forma y constan de dos rodillos que giran en sentido contrario uno del otro, así como velocidades iguales o diferentes, con superficies lisas o perfiladas, y (c) los extrusores de tornillo que pueden contener un tornillo (simple), dos (doble o gemelo) o más (múltiple), que rotan en el

interior de un cañón estacionario para empujar el material hacia y a través de un orificio de diseño especial (dado), aquí es importante conocer la configuración del tornillo, su velocidad y la temperatura de las diferentes secciones que componen el cañón (Dziezak, 1989).

Algunas de las características por las cuales la extrusión ha ganado popularidad son: (a) Versatilidad, al combinar los ingredientes y las condiciones de operación del extrusor es posible obtener una amplia variedad de productos ya existentes o nuevos. Los factores que contribuyen a la versatilidad son principalmente los diseños del extrusor, las variables de operación y la variedad de materias primas a procesar. (b) Costos reducidos, debido a los requerimientos de espacio por unidad de producción el proceso de extrusión tiene costos mas bajos que los de otros métodos. (c) Alta productividad, al presentarse un sistema de procesamiento continuo su capacidad de producción es mas grande que en otros procesos. (d) Producto de alta calidad, al utilizar temperaturas altas en tiempos cortos (HTST) se minimiza la degradación de nutrientes (por la acción del calor) y mejora la digestibilidad (por la gelatinización de almidón) y la desnaturalización de proteínas. (e) Diferentes formas del producto, se pueden obtener diferentes formas y figuras al utilizar diferentes dados. (f) Eficiencia en energía, al tener un sistema que opera a humedades relativas bajas, permite que la energía requerida para la cocción del alimento sea mínima. (g) Ausencia de efluentes, al no producir contaminantes se reducen costos en el tratamiento de efluentes.

Componentes de un extrusor. Los componentes con que cuenta un extrusor de tornillo principalmente son: el mecanismo de alimentación, el tornillo, el cañón, el dado y en algunos casos se puede contar con mecanismos de corte (Harper, 1989) y sistemas de regulación de presión y temperatura (válvulas y termopares) (Fig .10).

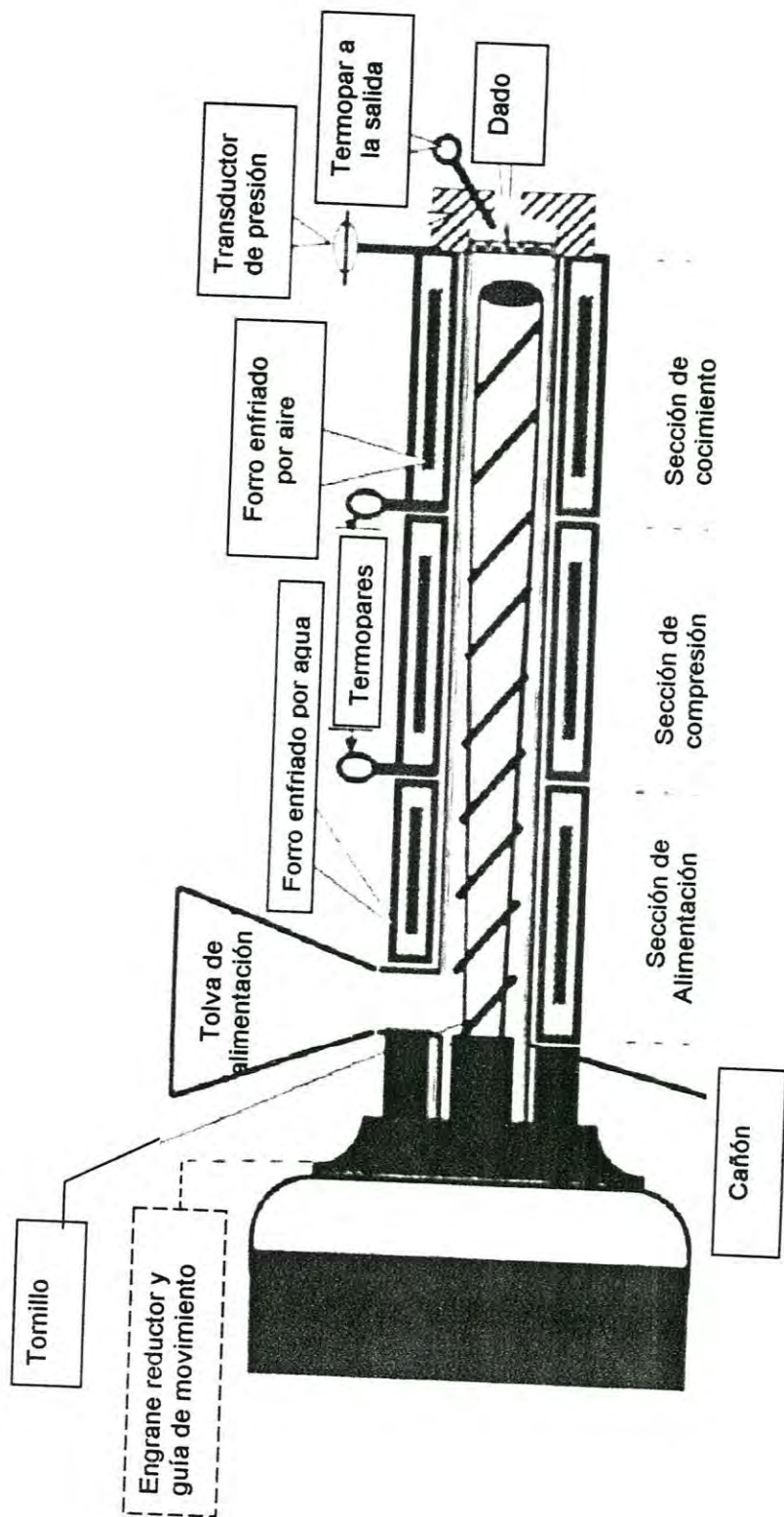
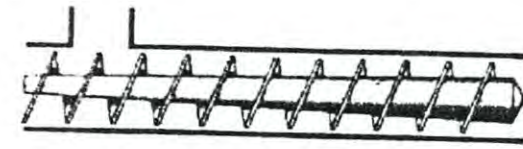


Figura 10. Componentes básicos del extrusor de tornillo simple.

Mian (2000).

Mecanismo de alimentación, esta compuesta por una tolva de alimentación donde es recibido el material a ser extrudido y un tornillo alimentador que se puede localizar vertical u horizontalmente. La tolva de alimentación puede estar equipada con un agitador que ayuda a mantener constante la alimentación proporcionando un producto mas homogéneo.

Tornillo. los diseños incluyen: diferentes inclinaciones, profundidades constantes, incremento del diámetro del eje, incremento del numero de alabes, y disminución del diámetro del eje, son los más empleados en la industria de los alimentos (Fig. 11). Los extrusores de tornillo simple pueden ser clasificados de acuerdo al movimiento y a la transformación del material dentro del extrusor en tres secciones : alimentación, amasado o transición y la zona final de cocimiento (Fig. 10) (Mercier *et al.*, 1989). (a) Sección de Alimentación, se caracteriza por tener alabes hondos que aceptan fácilmente los ingredientes crudos y los transportan hacia adelante, el aire es expulsado y los espacios vacíos son eliminados, haciendo que los alabes se llenen completamente. (b) Sección de compresión o transición, esta zona se caracteriza por la disminución de la altura de las hélices o restricciones internas consistentes de platos que restringen el área de sección transversal del tornillo al flujo, estas restricciones incrementan la relación de esfuerzo de corte y la energía mecánica suministrada al alimento, lo que resulta en un incremento de la temperatura. Los ingredientes húmedos son convertidos en una masa termoplástica por la gelatinización del almidón e hidratación de la proteína. (c) Sección de cocimiento, la presión, compresión y velocidad de corte son altas, esta zona se caracteriza por presentar hélices poco profundas o hélices con una disminución del paso de tornillo, la masa termoplástica pasa a plástica, se da una adición mayor de calor debido a la homogenización de la acción de corte. La función principal en esta sección es recibir el material comprimido, homogenizarlo y hacerlo pasar a través del dado a presión constante.



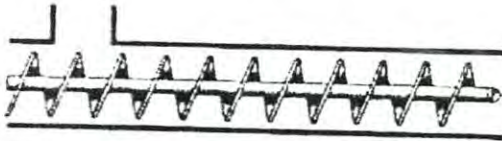
Pendiente constante, incremento del diámetro de la base (eje).



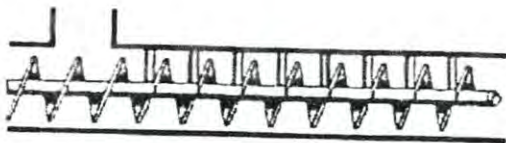
Pendiente constante, diámetro de la base (eje) constante, decrecimiento del diámetro del cañón.



Pendiente variable, profundidad constante, incremento del diámetro de la base (eje), incremento del número de alabes, decrecimiento del diámetro.



Pendiente constante, diámetro de la base (eje) constante.



Pendiente constante, diámetro de la base (eje) constante. Con tornillos interrumpido.



Pendiente decreciente, diámetro de la base (eje) constante.

Figura 11. Configuraciones de tornillos comunes empleados en extrusores de tornillo simple.

Mian (2000).

Cañón, en un extrusor generalmente esta constituido por secciones, por lo que la sección del cañón correspondiente al tornillo puede ser remplazada cuando se comienza a dañar. La superficie interna del cañón puede ser lisa, con ranuras longitudinales y con ranuras en espiral (Fig. 12). Las ranuras longitudinales permiten una mayor salida del flujo a través de la cumbre de los alabes del tornillo, además se incrementa el cocimiento en el extrudido especialmente si es utilizado en la zona donde se retiene el material dentro del barril. Las superficies internas en espiral también incrementan el flujo de salida pero actúan como una extensión de los alabes del tornillo por que la dirección de estas hélices así como el material es conducido hacia delante y mediante diferentes configuraciones se puede incrementar el transporte del material (Mian, 2000).

Los segmento individuales con que cuenta el cañón presentan un recubrimiento para el control de la temperatura, por los que circula un medio de enfriamiento que generalmente es agua. Estas zonas juegan un papel de importancia en cada zona, en la primera zona (alimentación) reduce la humedad del material de vaporización, las siguientes dos zonas (transporte y cocimiento) operan a altas temperaturas y el calentamiento es obtenido por diferentes fuentes como: presión a vapor, agua caliente, aceite térmico y calentadores eléctricos (Mian, 2000).

Dado, tiene dos funciones, la de moldear el producto a una forma requerida y restringe el flujo para incrementar la presión en la zona de cocción. Por la determinación de la forma y la calidad del extrudido, se han desarrollado un gran numero de dados que van desde un dado simple en forma de cilindro hasta dos dados múltiples en donde se combinan la salida de dos extrusores, obteniendo así características duales tales como dos colores o sabores.

Mecanismos de corte, son utilizados en algunas ocasiones para cortar el producto extrudido cuando sale del extrusor. La longitud de corte esta

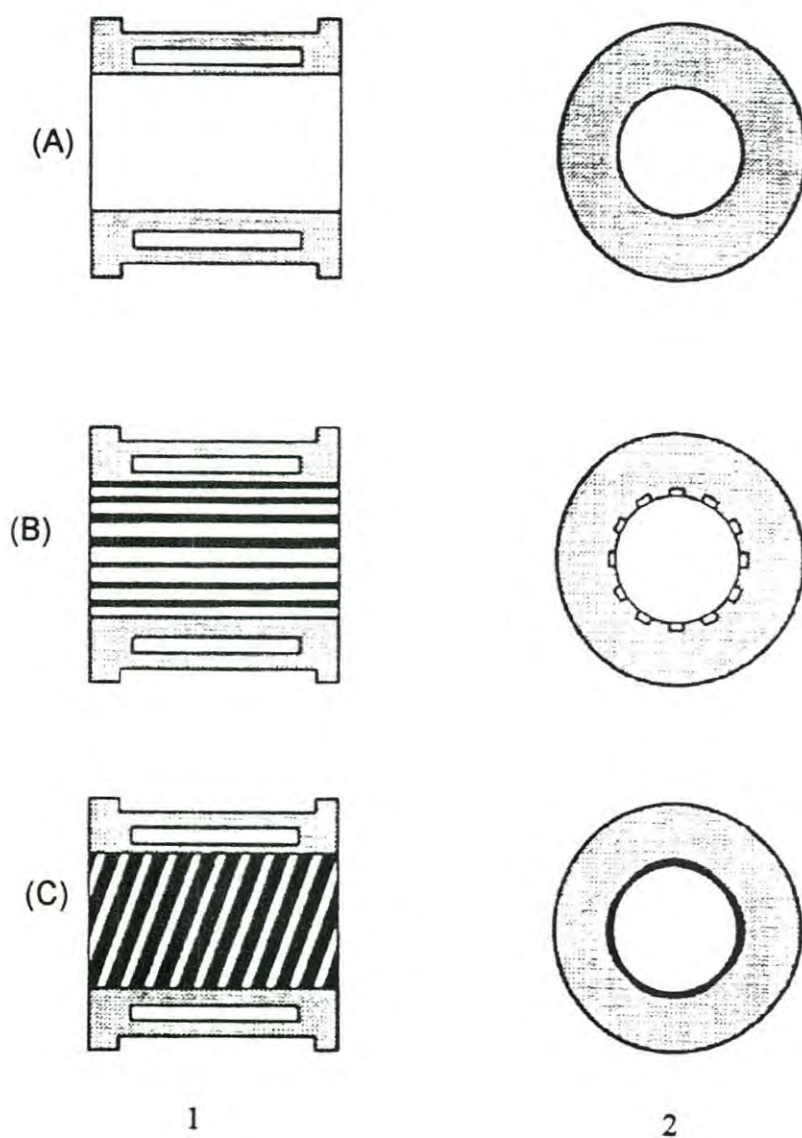


Figura 12. Configuraciones típicas de las paredes internas del cañón en un extrusor de tornillo simple, vistas longitudinal y frontal (1,2). (A) Diámetro interior liso, (B) acanalado (ranura) longitudinal, (C) Acanalado (ranuras) en espiral.

Mian (2000).

determinada por la velocidad de la navaja de corte. Los mecanismos mas comunes de corte son las cuchillas horizontales y verticales. (Harper, 1981).

Las propiedades de los ingredientes es otro de los parámetros a considerar durante la extrusión, dentro de los mas importante tenemos: el contenido de humedad, el tamaño de partícula, la composición principalmente de almidones y proteínas del material crudo (Oikku *et al.*, 1983).

Nixtamalización por extrusión

La cocción por extrusión también ha sido evaluado como tecnología para producir harina para tortillas. Un extrusor, marca Wenger 8-5, fue empleado para la elaboración de masa y tortillas utilizando maíz normal molido adicionandole diversas concentraciones de cal (de 0,1 % a 1,0 %) (Bazua *et al.*, 1979). Las masas y tortillas elaboradas mediante extrusión se compararon con las obtenidas mediante el proceso tradicional para determinar sus propiedades organolépticas así como su contenido de lisina, triptófano y proteínas. No se observaron diferencias apreciables a diferentes niveles de hidróxido de calcio. Con la adición de 0.2 %, se perdió el 8 % del triptófano, mientras que con 1 % de cal, se perdió más del 25 % del mismo aminoácido. También se observaron algunas pérdidas de lisina. Los resultados organolépticos mostraron que se pueden elaborar tortillas aceptables utilizando la extrusión como proceso alterno.

Harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión de harina de maíz con el uso de hidrocoloides (gomas), por ejemplo: carboximetilcelulosa (CMC), goma árabica, guar y xantana, se estudiaron a diferentes concentraciones de cal (0.1, 0.2 y 0.3 %) (Arámbula *et al.*, 1999). 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 (rolabilidad, 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 0.5 % (p/p) de la goma xantana agregada antes de la extrusión. Estas masas producen tortillas con características de textura aceptable.

Existe, además, la opción de enriquecer con otros nutrientes las harinas extrudidas (como el caso de las harinas precocidas con harinas extrudidas con 5 % de harina de soya también extrudida) y en donde no se alteran las características de las tortillas, pero aumentan su contenido de proteínas (Durán, 1978).

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 r.p.m. 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 concluye que la extrusión es factible de ser usada como un método alternativo en la elaboración de tortillas de maíz, siempre y cuando se encuentren las condiciones apropiadas de la materia prima, como lo es la granulometría de la harina que es función del tipo de molino y de la abertura de la malla empleada, el contenido de humedad inicial y las variables del proceso como son y temperatura, velocidad del tornillo y un extrusor con bajo grado de cizallamiento. La energía térmica que se adiciona así como la generada por la fricción puede alterar las propiedades químicas, físicas y reológicas del material procesado y sus productos (Wang *et al.*, 1992).

Algunos investigadores han reportado el empleo de extrusores cocedores ("HT-ST, alta temperatura en corto tiempo) como reactores continuos, con la finalidad de elaborar masa y/o harinas instantáneas para la preparación de tortillas y botanas de maíz (Duran *et al.*, 1978; Bedolla, 1983; Gómez y Aguilera, 1983; Martínez, 1988; Jonson y Horner, 1990). Sin embargo, el proceso de cocimiento por extrusión ha probado ser factible para la preparación de harinas instantáneas.

En algunos estudios para la elaboración de harina por el proceso de extrusión, el producto obtenido no presentaba características similares a las comerciales (Serna-Saldivar *et al.*, 1987) esto fue atribuido principalmente a un grado de cizallamiento y temperatura elevado debido al diseño del equipo, lo que resulto en un alto grado de gelatinización del almidón, originando una masa pegajosa y difícil de manejar para la obtención de tortillas de buena calidad (Martínez-Bustos *et al.*, 1996 b).

Milan-Carrillo *et al.* (2002), reportan un proceso tecnológico (nixtamalización, extrusión, fermentación en estado sólido, para la producción de harinas instantáneas para consumo humano a partir de MCP donde se utilizó como variables respuesta indicadores de calidad de las harinas: digestibilidad proteínica *in-vitro*, IAA, ISA, diferencia total de color, pH y proteína verdadera; en lo referente a la harina MCP extrudida se tuvo una temperatura de extrusión de 79.4 °C, concentración de cal 0.024 % 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.

En estudios anteriores de nixtamalización por extrusión, han sido evaluados los efectos que se presentan en la harina obtenida, dentro de estos encontramos

principalmente: la concentración de cal, humedad y tiempos de residencia de la harina a procesar, así como la velocidad y temperatura en el extrusor.

La concentración de cal ha mostrado cambios en el color y la expansión del extrudido. Con respecto a la variable humedad se presentan fenómenos de aislamiento, difusión y expansión. La velocidad del extrusor que influye sobre la absorción de agua y la densidad principalmente. La temperatura (expansión, densidad), los tiempos de residencia (cocción). A su vez, los efectos combinados de estas variables sobre las propiedades funcionales de la harina.

Cambios que ocurren durante la Nixtamalización por el Proceso de Extrusión

Areas (1992), menciona que durante la extrusión, se presentan cambios en los principales componentes del grano. En el almidón, durante el cocimiento a una cantidad adecuada de agua se presenta la gelatinización en el almidón y a este fenómeno son asociadas varias etapas como la hidratación, el hinchamiento, la absorción de calor y la pérdida de la cristalinidad que es determinada a través de cambios de birrefringencia y patrones de difracción de rayos X; el principal cambio que sufre el almidón durante el proceso de extrusión es la ruptura de la región cristalina en el granulo seguida la perdida de su integridad (por el esfuerzo de corte y temperatura dentro del extrusor). Las principales modificaciones que sufren las proteínas durante la extrusión son la desnaturalización, disociación, desenredado, y alineamiento de las proteínas en la dirección del flujo y finalmente el cruce-enlace de esas moléculas en la salida del dado a través de enlaces específicos.

Gomez-Aldapa (1996) reporta que el uso del maíz integral en el proceso de extrusión mantiene los niveles de proteína en la tortilla, con valores similares al maíz integral, además de presentar un mayor contenido de fibra dietaria al

incrementarse la concentración de cal (utilizada para la elaboración de tortillas), esto es debido a la formación de compuestos insolubles que resultaron de la reacción de Maillard y la desnaturalización y formación de enlaces cruzados entre proteínas, además de la presencia del pericarpio hace que se incremente el contenido de la fibra.

Son varios los estudios que se han realizado para determinar el efecto de las variables del proceso de extrusión sobre las propiedades funcionales, fisicoquímicas y nutricionales de diversos productos de cereales y leguminosas extrudidos. 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 (Creusot-Loire, Modelo BC45) a temperatura de 70 a 225 °C y a una humedad constante de 22 %, los resultados obtenidos muestran que el IAA se incrementó al aumentar la temperatura, a un rango de la temperatura de 135 °C a 225 °C la expansión del extrudido se incremento, el IAA permaneció constante, mientras que la viscosidad de la pasta a 50 °C disminuyó. Lawton *et al.* (1972), estudiaron el efecto de las variables de un extrusor Brabender de tornillo simple (1.91 cm de diámetro y relación de compresión 1:1, 1:3, 1:5) sobre la gelatinización del almidón de maíz, las temperaturas utilizadas fueron de 90-150 °C y a una humedad de 27-39 %, los resultados indicaron que la gelatinización máxima se dio a la mayor humedad y temperatura, la viscosidad fue baja por el mezclado intensivo en el cilindro a la cocción uniforme lo que ocasiono una sobre gelatinización, a mayor velocidad del tornillo redujo el efecto de la gelatinización a tiempos reducidos de residencia dentro del extrusor. Chen *et al.* (1991), mencionan que la temperatura y la velocidad del tornillo en el proceso de extrusión tiene un efecto importante sobre el índice de expansión y la densidad de los extrudidos.

San Martín-Martínez (2003), menciona que la nixtamalización del pericarpio causa la ruptura de la estructura celulosa-hemicelulosa-lignina, así como la presencia de pequeñas trazas de proteínas dentro de la solución, esto ocasiona

tortillas con calidad reologica. En el endospermo, el efecto de la cal en la nixtamalización hace que se de la formación de complejos (grupo hidroxilo de la amilosa y amilopectina con los iones calcio) en los gránulos del almidón lo que probablemente incremente los valores de viscosidad (Fernández-Muñoz *et al.*, 2002), lo que se traduce en que altas concentraciones de cal den bajos valores de viscosidad, esto probablemente es debido a la hidrólisis de algunos componentes del granulo de almidón.

El efecto de las variables del proceso de extrusión-cocción sobre el valor nutrimental de diversos alimentos de origen vegetal han sido revisados por varios autores (Bjorck y Asp, 1983; Asp y Bjorck, 1989; Mercier, 1993) (Tabla 4). Lawtyon *et al.* (1972) estudiaron el efecto de las variables de un extrusor de tornillo simple sobre la gelatinización del almidón de maíz, se utilizo un extrusor Brabender con un cilindro de 1.91 cm de diámetro y tres tornillos con una relación de compresión de 1:1, 1:3 y 1:5. las dos variables que ejercieron el efecto mas significativo sobre la gelatinización fueron la temperatura del cilindro (90-150 °C) y el contenido de humedad (27-39 °C), de este estudio se concluyó que la gelatinización máxima se dio al valor de humedad mas alto, la viscosidad fue baja a altas temperaturas y humedades debido al mezclado intensivo en el cañón y a la cocción uniforme ocasionando una sobregelatinización. Un aspecto de importancia fue que a la mas alta velocidad del tornillo redujo la gelatinización, esto debido al presentarse tiempos reducidos de residencia del material dentro del extrusor.

Martínez-Bustos (1996 b) menciona que las propiedades texturales (al medir su fuerza de tensión y fuerza de corte, por métodos instrumentales y rolabilidad como método subjetivo) de las tortillas elaboradas por el proceso de extrusión continua, se ven afectadas, ya que influyen variables de importancia como es el tamaño de partícula, la transferencia de calor y la difusión de la solución alcalina.

Tabla 4. Efecto de diferentes variable del proceso de extrusión sobre algunos parámetros fisicoquímicos y nutrimentales en alimentos de origen vegetal.

Variable de Extrusión	Almidón			Vitaminas			
	Lisina disponible	Gelatinización	Dextrinización	B1	B3	C	A
Temperatura	D ²	I ¹	I ¹	D ² , SE ⁶	I ¹ , SE ⁶	D ²	SE ⁶
Humedad	I ¹	TA ³	NR ⁵	I ¹	D ² , SE	TA/H B ⁴	NR ⁵
Vel. Tornillo	D ² , SE ⁶	D ²	NR ⁵	D ² , SE ⁶	D ²	D ²	I ¹
Relación de compresión	D ²	NR ⁵	NR ⁵	SE ⁶	NR ⁵	D ²	NR ⁵
Diámetro del dado	I ¹	D ²	NR ⁵	I ¹ , SE ⁶	SE ⁶	D ²	NR ⁵
Torque	D ²	NR ⁵	I ¹	NR ⁵	NR ⁵	NR ⁵	NR ⁵

¹ Incremento.

² Disminución.

³ Temperatura Alta.

⁴ Temperatura alta, referido a humedad baja.

⁵ No reportado.

⁶ Sin efecto.

Asp y Bjorck (1979); Mercier (1993).

Técnicas de Optimización

Por optimización se entiende como la técnica de identificar la mejor solución (Namekforoosh, 1996), así como, lograr el máximo de los recursos disponibles o en su caso un mínimo con respecto a un determinado criterio o criterios en donde cada uno es establecido (Salvendy, 1990). 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. La tendencia en el desarrollo de la metodología para la superficies de respuesta ha sido la construcción de diseños experimentales compactos, con un mínimo de unidades experimentales; el investigador se concentra en las propiedades de los estimadores de todos los parámetros de la función de respuestas, propiedades que dependen del diseño empleado. 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-Encina *et al.*, 2002). El proceso de extrusión puede ser optimizado con ayuda del uso de los gráficos de superficie (Vargas-López *et al.*, 1990; Milán-Carrillo *et al.*, 2002). Así como las condiciones de extrusión optimizadas para la producción de harina de maíz (MCP) instantánea (Reyes-Moreno *et al.*, 2003). Sin embargo, resulta de interés para esta investigación observar el efecto que presenta la velocidad del tornillo en conjunto con la humedad de la muestra y la temperatura en el proceso de extrusión-cocción como variables independientes, así como la combinación de cada una de estas variables, además de conocer los valores donde se encuentran las mejores condiciones.

En un experimento de caracterización, normalmente nos interesa determinar cuáles variables del proceso influyen en la respuesta. Un paso siguiente es optimizar, o sea determinar en qué región los procesos importantes conducen a la mejor respuesta posible. Por lo que si la respuesta fuera aquella en

donde buscamos altos valores, buscaríamos las mejores condiciones por lo tanto las regiones donde los valores son máximos, mientras que si la respuesta fuera la variabilidad en una dimensión crítica del producto, se buscaría una región de variabilidad mínima, todo esto con ayuda de la metodología de superficies de respuesta en donde un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas se utilizan para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, y el objetivo es optimizar esta respuesta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Se utilizaron 30 kg de maíz de Alta Calidad Protéica (MCP V-537C), proveniente del Departamento de Agricultura de la Universidad de Sonora, cosechado en el ciclo primavera-verano 2002. Los granos fueron limpiados en una zaranda vibratoria Clipper (Marca BLOUNT/Ferrell-ross, Modelo M2BC; Bluffon, In, E.U.A). El grano limpio se identificó y colocó en sacos para posteriormente ser almacenado en un cuarto de refrigeración a temperatura de 5 °C, hasta su uso. El grano limpio, se dividió en 12 muestras de 2.5 kg cada una a través de un divisor de muestras (marca Boerner), obteniendo así muestras representativas (Fig. 13). Además con el fin de comparación de las harinas extrudidas obtenidas por extrusión, en el comercio local de Hermosillo Sonora, se obtuvo una harina nixtamalizada elaborada por la compañía MASECA.

Caracterización química

Se llevo acabo un análisis proximal del maíz MCP V-537C, así como de la harina comercial, se realizó 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 del Maíz

Las muestras limpias y homogeneizadas de maíz fueron molidas de manera integral (conservando su germen y pericarpio), en un molino de cuchillas

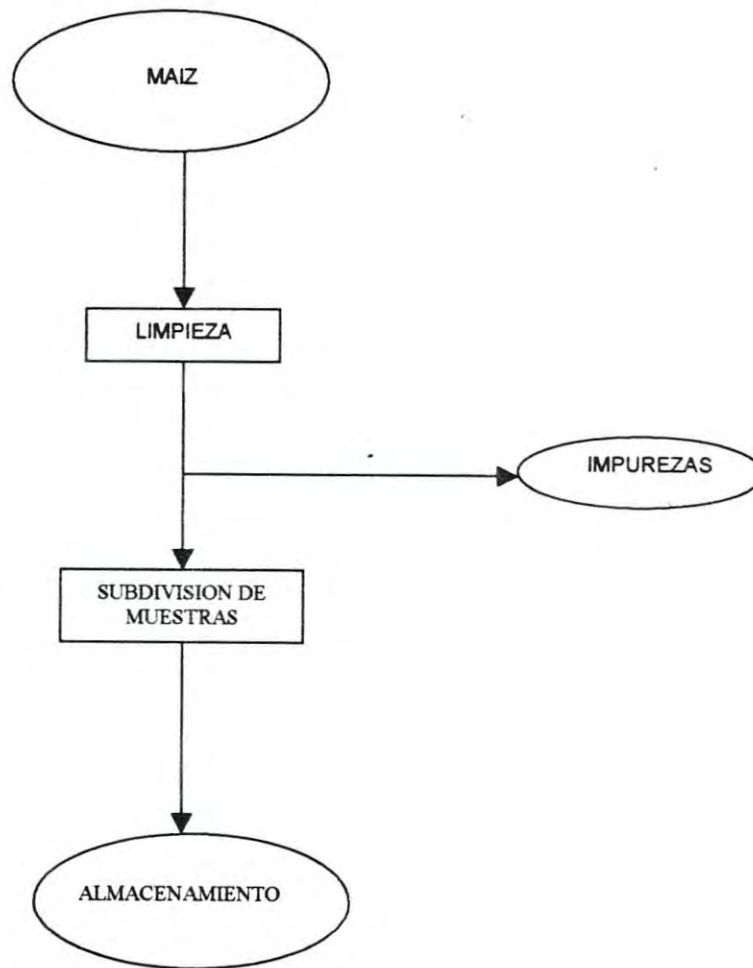


FIGURA 13. Limpieza y Preparación del grano de Maíz de Calidad Proteica

(Marca Thomas-Wiley, Laboratory Mill, Model 4 Thomas Scientific E.U.A), con una malla de 0.5 mm (500 μ m, tamiz USA No35).

Las muestras molidas se pasaron por un tamiz USA No 35 (500 μ m). Las muestras que no pasaron a través del tamiz fueron nuevamente molidas.

Proceso de Extrusión

Acondicionamiento

Al maíz molido a un tamaño de partícula de 0.5mm (500 μ m, tamiz USA No35), se le adicionó 0.3 % de cal p/p (grado industrial) y se mezcló con agua destilada por aspersion en una mezcladora industrial (Marca Horbat, Modelo AS200T, E.U.A) a baja velocidad (600 rpm) por espacio de 20 min/kg de harina a acondicionar, hasta alcanzar una humedad establecida de acuerdo al diseño experimental (27, 29 y 31%). Una vez uniforme la harina acondicionada se conservó en bolsas de polietileno por 12 horas a temperatura ambiente (25 °C), (Fig. 14).

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 las siguientes datos técnicos: diseño unidad en plataforma, con dimensiones (Longitud*Espesor*Altura) aproximadas de 850*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;

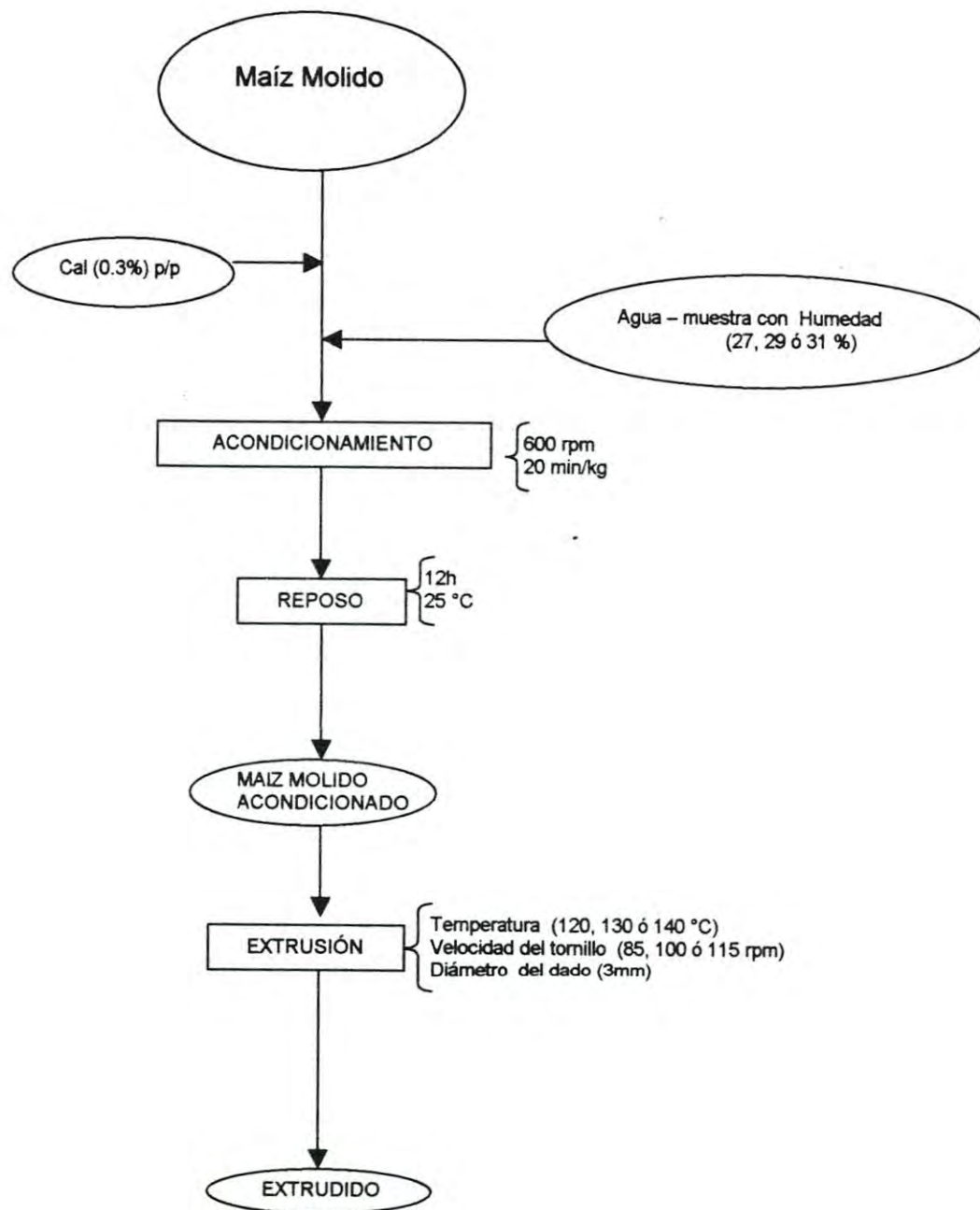


Figura 14. Proceso de extrusión utilizando Maíz molido de Alta Calidad Proteica

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 las seleccionadas de combinaciones factoriales de las variables del proceso (Temperatura del extrusor, Velocidad del Tornillo y Humedad de la muestra).

Para la obtención de los extrudidos previamente se ajustaron las temperaturas de las cuatro zonas (3 se mantuvieron constantes a 60 °C y la última varió en un rango de 120 a 140 °C), así como las velocidades del tornillo (85-115 rpm) y la humedad del maíz molido acondicionado (27,29 y 31 %). Se utilizó el procedimiento descrito por Vargas-López (1990), con algunas modificaciones. Lotes de 1kg de maíz molido acondicionado se depositaron en la tolva de alimentación para ser extrudidos. El extrudido una vez seccionado se colectó en charolas y se enfrió a temperatura ambiente para ser almacenado en bolsas de polietileno. A los extrudidos obtenidos se le midió el porcentaje de expansión.

Porcentaje de expansión

Este análisis es utilizado 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:

$$\%Expansion = \left(\frac{\text{diámetro del extrudido}}{\text{diámetro del dado}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Obtención de las Harinas Nixtamalizadas Extrudidas

Secado de los Extrudidos

Los extrudidos fueron colocados y distribuidos a través de la superficie de una charola de acero inoxidable con dimensiones de 41X41X1 cm (LargoXAltoXAncho). Las charolas fueron colocadas en un secador tipo túnel (sin marca), ajustándose el flujo de aire a contracorriente a temperatura de 70 °C en un tiempo de 2 h. Posteriormente, las muestras fueron enfriadas dentro del secador durante 10 min. Los extrudidos secos fueron colocados y colectados en bolsas de polietileno para su posterior molienda.

Molienda

El extrudido seco fue molido en un molino de cuchillas (Marca Thomas-Wiley, Laboratory Mill, Model 4 Thomas Scientific. E.U.A), con malla de 0.5 mm (tamiz USA No 35 ,500 μm) (Fig. 15). La harina nixtamalizada se almacenó en bolsas de polietileno para su análisis posterior.

Evaluación de las Harinas

Las evaluaciones se realizaron tanto a las harinas extrudidas (HMNE) como a la harina de maíz nixtamalizada comercial (HMNC) con el fin de comparación.

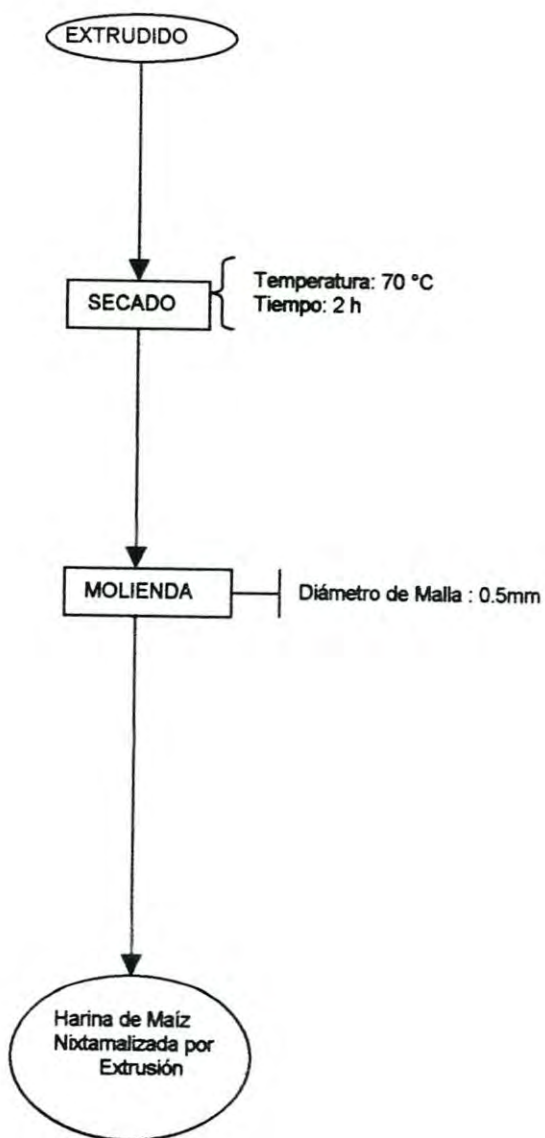


Figura 15. Producción de la harina de maíz de alta calidad proteica nixtamalizada por extrusión

Humedad (HUH)

Se realizó siguiendo el método 44-15 de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 2001).

Distribución del tamaño de partícula (DTP)

La DTP nos indica la funcionalidad que presenta la harina (Gómez *et al.*, 1987; Sahai *et al.*, 2001). Para determinarla se tomo una muestra de harina (50 g), se colocó en una pila de 5 mallas de la serie de tamices U.S. número 20 (841 μ m), 40(420 μ m), 60 (250 μ m), 80 (177 μ m), 100 (149 μ m) y fondo. Las mallas se colocaron en el equipo de rotación Rotachoc (Chopin, Francia). Después de someter a agitación durante 5 min, se separo cada fracción de las mallas con ayuda de una brocha y se pesaron las fracciones retenidas en las diferentes mallas. La distribución obtenida se reporto como el porciento de retención en cada malla en base a la muestra inicial de harina, como se indica a continuación:

$$\%DTP = \frac{\text{g retenidos en cada malla}}{\text{muestra inicial de harina}} \times 100 \quad (2)$$

Índice de tamaño de partícula (ITP)

El índice del tamaño de partícula es un indicador de la calidad en harinas, ya que altos valores nos dan partículas mas finas que se relacionan con masas mas cohesivas, asi como un mejor inflado y rollabilidad en tortillas (Gómez *et al.*, 1992).

El ITP fue obtenido de acuerdo a la metodología descrita por Bedolla *et al.* (1984), utilizando la siguiente formula:

$$ITP = \sum [(FN_o M_i) (\%DTP_i) + \dots + (FN_o M_n) (\%DTP_n)] \quad (3)$$

Donde:

$FN_o M$ = Factor de numero 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 es obtenido como se menciona en el análisis de distribución del tamaño de partícula.

Índice de Absorción de Agua (IAA)

El IAA es un parámetro de calidad relacionada con la optima absorción de agua y un indicador de rendimiento en masa fresca (Flores-Farias, 1997; Molina *et al.*, 1977; Martínez-Bustos *et al.*, 1996). Para su determinación se utilizó el método modificado por Anderson *et al.* (1969). En un tubo para centrifuga 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 GO1305A, Ashville, N.C, USA). El peso del gel se registró como el del precipitado, y el IAA se calculó con la siguiente ecuación:

$$IAA = \frac{(PG - PMbs - PMS)}{PMbs} \quad (4)$$

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 agua/g de muestra seca.

Índice de Material Soluble (IMS)

El IMS es un parámetro que nos indica la cantidad de material que es disuelto por el agua cuando la harina es sometida a un exceso de agua, as como el grado de cocimiento en la harina (González *et al.*, 2001). 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. A través de la siguiente ecuación:

$$IMS = \frac{(\text{peso del material soluble en el sobrenadante})}{\text{peso seco de la muestra inicial}} \times 100 \quad (5)$$

Densidad Aparente (Dap)

La Dap, es un parámetro que se relaciona con el proceso de secado y molienda durante la elaboración de la harina de maiz nixtamalizada (Flores-Farias *et al.*, 2002; Gómez *et al.* 1992 y Arambula *et al.*, 1998). Para esta prueba se utilizó un recipiente de hierro fundido con un diámetro interno de 29.84 mm, una altura de 49.70 mm y con una capacidad de 32 mL, el cual fue previamente estandarizado a temperatura de 25 °C. La determinación se realizó de la siguiente manera: se colocó un embudo en un soporte universal y en la parte

inferior el recipiente. Una vez vertida la harina cuidadosamente dentro del embudo se abrió la compuerta de paso y se dejó fluir libremente la harina. Con ayuda de una regla se rasó la harina excedente y se pesó el recipiente de volumen conocido. Para obtener la Dap de las harinas se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{peso de la harina}}{\text{volumen del recipiente}} \quad (6)$$

La densidad aparente se expresó en g/cm^3 , se realizó por triplicado.

pH

El pH es un indicador de las condiciones del proceso, además se relaciona con la coloración de la harina y sabor en la tortilla (Faubion *et al.*, 1982; Almeida y Roney.,1996; Bedolla y Rooney. De las harina se midió de acuerdo al método 02-52 (AACC, 1995). Una suspensión con 10 g de harina y 100 mL de agua destilada (recientemente hervida), se agitó 15 s cada 5 min a velocidad alta hasta un total de 20 min. Al estar en agitación en la muestra se sumergió un electrodo de un potenciómetro (Marca Corning, Modelo GO1305A, Ashville, N.C, E.U.A) para medir el pH, esta prueba se realizó por triplicado.

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 dimensiones 3.5 (diámetro) X 1cm de altura y se midieron los parámetros correspondientes L (luminosidad, mayor 100, menor 0), a (+hacia rojo, -hacia verde) b (+hacia amarillo, - hacia azul). Se utilizó un mosaico blanco como referencia de valores

L, a y b conocidos (L=97.63, a=-0.78, b=2.85) (Milan-Carrillo, 2003; Francis, 1995).

Difracción de rayos X

Este análisis se emplea para conocer la estructura cristalina que se presenta en las harinas y sus efectos debido a las condiciones del proceso. (Noreña, 1995). Los patrones de difracción de las harinas obtenidas de cada etapa del proceso se determinaron en un difractómetro de rayos X Rigaku-Geigerflex (Tokio, Japón), utilizando radiación de cobre k-alfa a una longitud de onda de 1.5406 Å. Los resultados se reportaron como valor de distancia d interplanar expresado en Å. Para encontrar la distancia interplanar se utilizó la ecuación de la ley Bragg:

$$\eta\lambda = 2d\text{Sen}\theta \quad (7)$$

donde:

η = Numero de longitudes de onda

λ = Longitud de onda

d = Distancia interplanar

Evaluación de las Masas

Elaboración de las Masas

De cada muestra de HMNE se pesaron 100 g y se le adicionó agua hasta alcanzar una consistencia adecuada, así como se indica en la prueba capacidad de Absorción de agua subjetiva (Flores-Farias *et al.*, 2002) para el mezclado se utilizó una mezcladora (Marca Kitchen Aid, Modelo MK4588WH St Joseph, Michigan, EUA).

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. Para esta prueba se utilizó la metodología descrita por Flores-Farias *et al.*, (2002). Se pesaron 100 g de harina, se adicionó 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 (Flores-Farias *et al.*, 2002).

Humedad

Esta determinación esta relacionada con la dureza y adhesividad de la masa (Campas-Baypoli, 1997; Ramírez-Wong *et al.*, 2002) se realizó utilizando el Método 44-15 (AACC, 2001). La humedad de las masa se eliminó utilizando una estufa con circulación de aire (Marca Tripette & Renaud, Modelo EM10, Villeneuve La Garenne, France) por 1 h a 130 °C.

Medición de Textura

Se utilizó el método de compresión y tensión propuesto por Ramírez-Wong *et al.* (1989), en donde nos indica la relacion existente entre la fuerza de tension y compresión a través del Texturometro Instron (Marca Instron EGINEERING Corp; Modelo 1130; Canton MA, E.U.A). Consiste en dos platos lisos de acero inoxidable (6.9 cm de diámetro). El plato colocado en la parte inferior se encuentra fijo y el otro es colocado en el cabezal del texturometro, este ultimo se mueve hacia abajo o hacia arriba a velocidad (50 mm/min), con una celda de carga de 5 kN y la distancia entre platos se estableció con anterioridad (2 mm). A 5 ± 0.05 g se le dio forma esférica y fue moldeada dentro de un cilindro plástico con diámetro de 31 mm y 6 mm de espesor. El disco de masa fue colocado entre los dos platos lisos metálicos cuidando de que estuviera centrado

en el plato fijo. La compresión se llevo acabo hasta que la distancia entre los platos fue de 2 mm (simulando el grosor de la tortilla), entonces el cabezal se detiene y de manera automática comienza el movimiento en dirección opuesta. Esto genera una grafica con dos curvas, una de la fuerza máxima de compresión (pico máximo de la curva positiva del grafico), asi como el valor mínimo de la curva negativa del grafico (fuerza máxima de tensión) respuesta (Fig. 14). El factor de compresión y tensión se define como la relación de la fuerza de compresión y tensión obtenidas con la prueba de compresión/tension en el equipo de textura Instron.

Evaluación de las Tortillas

Preparación

La elaboración de la tortilla con cada harina obtenida por extrusión, se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Martín-Martínez *et al.*, (2003), se elaboraron bolas de masa con un peso aproximado de 20 g y a través de una maquina tortilladora (Marca TORTIMEX; Jalisco México) se moldean los discos, hasta un diámetro de 12.5 ± 0.1 cm y un grosor de 1.19 ± 0.1 mm. Los discos de masa fueron cocidos en una estufa comercial a una temperatura de 270 ± 10 °C por 15 s de un lado, seguido por 30 seg del otro y nuevamente 15 s en el primer lado (en donde se da el inflado) de la tortilla. Las tortillas se enfriaron por 30 min a una temperatura de 25 °C y después se empacaron en bolsas de plastico y se almacenaron a temperatura ambiente (Fig. 16).

Durante el tiempo final de cocimiento en la tortilla se evaluó de manera subjetiva el grado de inflado, basandose en la metodología descrita por Flores-Farias *et al.*, (2000), se asignó una escala de 1 a 3, donde 1 corresponde a un inflado completo (70-100 %), 2 a un inflado medio (30-70 %) y 3 no se presento inflado (0-30 %).

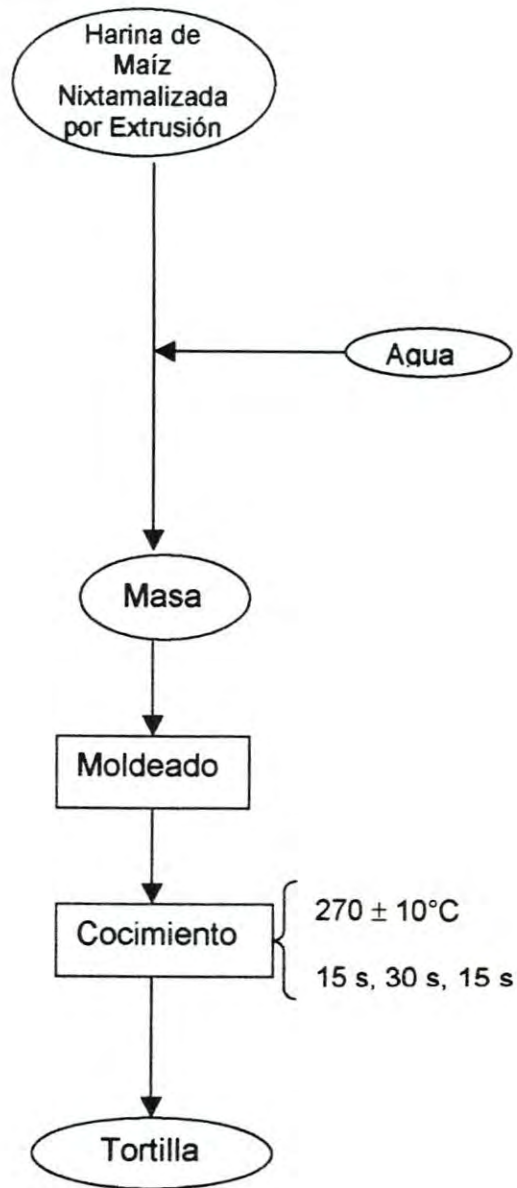


FIGURA 16. Producción de masa y tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión

Evaluación

Características Físicas

Se evaluaron tres características: peso (balanza digital OAHUS, USA), diámetro y espesor de tortilla (Verniere digital UNOX Metromex, México).

Propiedades Texturales

La firmeza y rollabilidad en tortilla fueron evaluadas a diferentes tiempos de almacenamiento (2, 24 y 48 h). Para cada tortilla y tiempo de almacenamiento, fueron colocadas tres tortillas en bolsas de polietileno y se almacenaron en un cuarto a temperatura ambiente (25 °C) hasta su análisis.

Firmeza

Es un parámetro que nos indica la dureza que presenta la tortilla (Ramirez-Wong y Ortega.,1994). Se utilizó un texturometro (marca Instron, modelo 4465, Canton, MA, USA), al cual se le conectó la celda de Kramer. Se corto una pieza del centro de la tortilla de área de 41.47 cm² y se colocó en la caja rectangular de la celda de Kramer. Al bajar el cabezal del texturometro se aplicó una compresión uniaxial y se registró la fuerza requerida para romper la tortilla. Se obtuvo una curva típica de deformación y ruptura en el graficador. Se utilizó la celda de carga de compresión y tensión de 500 kg, la velocidad del cabezal fue de 10 cm/min. La firmeza se expresó como el esfuerzo máximo en kg r, 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 si la tortilla no se rompe, 3 si se rompe de manera parcial, y 1 si se rompe completamente (Waniska, 1976).

Con harina comercial se obtuvieron masas y tortillas, así como sus respectivos análisis de igual forma a la obtenida por el proceso de extrusión, con la finalidad de comparar con el proceso desarrollado.

Diseño de Experimental y Análisis Estadístico

Para encontrar las condiciones óptimas de los factores estudiados se seleccionaron aquellas variables respuestas que son más representativas en el control de calidad de la harina, masa y tortilla de maíz nixtamalizado, como son: el índice de Absorción (IAA), la luminosidad (CL), tendencia al amarillo (Cb+) y el factor compresión tensión (FCT).

El número de tratamientos estudiados se estableció para el ajuste de un modelo de primer orden y el delineamiento usado fue para un modelo central compuesto. Este delineamiento consiste de un factorial 2^k y n_0 puntos centrales (Montgomery, 1991). Las variables independientes así como sus niveles fueron definidos después de los trabajos preliminares y así se determinaron los niveles máximos y mínimos para cada variable. Los niveles fueron codificados de la siguiente forma:

Variables Independientes:

X1 = T = Temperatura de la cuarta zona del extrusor (°C)

X2 = H = Humedad de acondicionamiento del maíz molido (% b.s.)

X3 = VT = Velocidad del Tornillo del extrusor (rpm)

Otras 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), el tamaño de partícula del maíz molido que paso a través de malla 0.5mm (500 µm, tamiz serie U.S 35) y la velocidad de alimentación al extrusor (45 rpm).

En la Tabla 4 se presentan los niveles de variación y su codificación, mientras que en la Tabla 5 se muestra la matriz del diseño utilizada, que fueron analizadas de acuerdo con el Diseño Factorial 2³ propuesto con 4 puntos centrales para 12 unidades experimentales y tres variables. Las repeticiones en el punto central permitieron la estimación de la variabilidad.

De acuerdo con la metodología de superficie de respuesta (Bender, 1976; Cochran e Cox, 1957; Hill y Hunter, 1966; Henika y Palmer, 1976), los datos experimentales se utilizaron para determinar los coeficientes (β_0) de la ecuación de expansión de la serie de Taylor (Polinomial cuadrática) cuya expresión general es:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \varepsilon$$

..... (6)

Siendo Y_i la función respuesta genérica y X_1 , X_2 y X_3 variables independientes. β 's son los coeficientes estimados por los métodos de mínimos cuadrados y ε los residuos que miden el error experimental, representado por una distribución normal, con media de cero y variación igual a sigma cuadrada.

Tabla 4 . Variables y niveles de nixtamalización del maíz molido

Variables / Códigos	Niveles ⁴		
	-1	0	1
X1 = T ¹	120	130	140
X2 = H ²	27	29	31
X3 = VT ³	85	100	115

¹H= Humedad,

²T= Temperatura,

³VT= Velocidad del tornillo

⁴Nivel inferior (-1), superior (+1) y medio (0)

Tabla 5. Matriz de diseño para la nixtamalización del maíz molido

Tratamiento	Orden	H ¹	T ²	VT ³	H	T	VT
1	5	-	-	-	27	120	85
2	7	+	-	-	31	120	85
3	2	-	+	-	27	140	85
4	11	+	+	-	31	140	85
5	10	-	-	+	27	120	115
6	3	+	-	+	31	120	115
7	6	-	+	+	27	140	115
8	9	+	+	+	31	140	115
9	1	0	0	0	29	130	100
10	4	0	0	0	29	130	100
11	8	0	0	0	29	130	100
12	12	0	0	0	29	130	100

¹H= Humedad,

²T= Temperatura,

³VT= Velocidad del tornillo

La significancia del modelo se justifico mediante el análisis de la varianza (prueba F), y el efecto de las variables fueron observadas a través de los gráficos de superficie de respuesta.

Las variables respuesta fueron:

Índice de absorción de agua (g de agua/g de muestra seca),

Luminosidad (L) 0-100

Tendencia al amarillo (b+) ± 100

Factor compresión tensión en masa

Optimización

Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (MSR), como técnica para conocer el efecto que presentan las variables del proceso (Temperatura, Humedad y Velocidad del tornillo) de extrusión sobre las variables respuestas, (Índice de absorción de agua, color L y b, factor compresión tension) para la producción de harinas de maíz MCP extrudido con un extrusor de tornillo simple. Una vez obtenido el modelo se incluye las intercepciones, los coeficientes lineales e interacciones de cada variable respuesta obtenidos en los análisis de regresión. Los términos no significativos ($p \leq 0.05$) se eliminaron y se recalculo un nuevo polinomio (modelo de predicción) para cada una de las variables repuesta.

Los gráficos de contorno de cada una de las variables respuesta se utilizaron a traves de la metodología de superposición de superficies, para la observación y selección de la mejor combinación de humedad de la muestra acondicionada, temperatura y velocidad del extrusor de las harinas nixtamalizadas por extrusión (HMNE). Para llevar acabo estas operaciones se utilizo el programa STAT-EASE Desing Expert V 6.0.7 (Design Expert, 2002).

Análisis de datos no optimizados

Para el resto de las determinaciones se realizó un Análisis de Varianza (ANDEVA) de un factor, donde cada factor es el tratamiento (análisis realizado). Se obtuvieron los niveles de significancia (valor de p) a un nivel 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.

Cada variable respuesta fue para las diferentes determinaciones hechas: al extrudido: - Expansión (%); a la Harina de maíz nixtamalizado por extrusión: - Humedad, -Índice de tamaño de partícula, Densidad aparente (g/cm^3), pH, Índice de material soluble ($\text{g sólido sol.}/\text{g muestra seca}$); a la masa: capacidad de absorción subjetiva ($\text{mL}/100 \text{ h de harina}$), humedad (%); y a la tortilla: peso (g), diámetro (cm), espesor (mm), Inflado, Rollabilidad (2, 24 y 48 h) y Firmeza (kg).

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 Intitute Inc., Cary, NC, USA, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSION

Para llevar acabo el análisis de los resultados obtenidos se realizó un ANDEVA de un solo factor (donde cada factor es el tratamiento) para las caracterizaciones del producto extrudido (Expansión), de la HMNE y HMNC (Índice de tamaño de partícula, Densidad aparente, pH, Índice de Material Soluble), en masa (capacidad de absorción subjetiva, humedad) y en tortilla (determinaciones físicas, inflado, rollabilidad y firmeza); así como el calculo de los coeficientes de correlación simple. Los tratamientos mas significativos en el control de calidad de producto (índice de absorción y color en HMNE y el factor compresión tensión en masa) fueron analizados con ayuda de la metodología de superficie de respuesta y optimizados para obtener las mejores condiciones del proceso de elaboración de la HMNE.

Caracterización de la Materia Prima

Composición Química del Maíz y Harina Comercial

La composición química del grano de maíz utilizado (MCP V-537 C) y la harina de maíz nixtamalizado comercial (HMNC) se muestran en la Tabla 6. Se puede observar que el grano de MCP presenta un contenido de humedad de 8.53 %, cenizas 1.42 %, grasas 6.04 %, proteínas 9.13 %, encontrándose dentro de los valores obtenidos en estudios realizados por Buendía (1981), Martínez-Bustos *et al.* (2000) y Reyes Moreno *et al.* (2003). En la HMNC se encontraron valores de 10.05 %, 1.32 %, 5.36 % y 8.01 % para las determinaciones de humedad, cenizas, grasas y proteínas, respectivamente, presentando similitud a los resultados obtenidos por Bedolla y Rooney (1984), Flores-Farias *et al.* (2000), Bello-Perez *et al.* (2002), Milán-Carrillo (2003) y Reyes Moreno *et al.* (2003). El contenido de carbohidratos fue similar tanto para el MCP como

Tabla 6. Composición Química de Maíz (MCP) y de la Harina Comercial.

Determinación	MCP V-537 C	HMN Comercial
Humedad (%)	8.53 ¹ ± 0.16 ²	8.74 ¹ ± 0.15 ²
Cenizas (%)	1.42 ± 0.01	1.32 ± 0.006
Grasas (%)	6.04 ± 0.07	5.36 ± 0.18
Proteínas (%)	9.13 ± 0.11	8.01 ± 0.30
Otros Carbohidratos ³ (%)	74.88	75.26

¹Los valores son el promedio de tres repeticiones en base seca.

²Desviación estándar.

³Se obtuvieron por diferencias.

para la HMNC, las diferencias entre ambos fueron similares a los datos reportados por Reyes-Moreno *et al.* (2003).

Pons-Hernandez (2004) reporta un contenido de aceite y proteína (4.3 y 8.6 % respectivamente) en MCP V-537C. Bedolla y Rooney (1984), reportan que la variabilidad en humedad, proteína y contenido de carbohidratos en harinas de maíz nixtamalizado es debido a los genotipos de maíz utilizado, la textura del endospermo, tiempo de almacenamiento y la variación de temperatura-tiempo durante el proceso de cocción entre otros.

El grano de MCP presentó ligeramente un contenido mayor de proteína al de la HMNC. Esto podría encontrarse asociado de manera directa a la dureza del grano (Salinas *et al.*, 1992), en donde se tiene una matriz proteica mas delgada y en un menor tamaño (Wolf *et al.*, 1952).

Caracterización del producto expandido

Para ver la diferencias entre tratamientos sobre la expansión del extrudido, se llevó acabo un análisis de varianza que se encuentra en la Tabla 7. Se puede observar que el tipo de tratamiento afectó muy significativamente ($p < 0.01$) a esta determinación. En la Tabla 8 se presentan los valores promedio del porcentaje de expansión de los extrudidos de cada tratamiento, el valor mínimo (1.07 %) se presentó a condiciones de procesamiento de $H=31$ %, $T=120$ °C y $VT=85$ rpm, mientras que el valor máximo (17.93 %) se dio a $H=27$ %, $T=140$ °C y $VT=85$ rpm, el promedio global fue de 9.79 %. Entre cada tratamiento específico se presento diferencia significativa ($DMS=0$) a ($p < 0.05$).

En este estudio se puede mencionar que el porcentaje de expansión es un indicador de las condiciones del proceso de extrusión, por lo que un bajo porcentaje como el obtenido nos indica que en cada tratamiento las condiciones utilizadas fueron estables.

Tabla 7. Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre el extrudido de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F EXP
Tratamiento	12	
Error	26	Infinito ***
Total	38	

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

Tabla 8. Valores promedio de la expansión de los extrudidos de los tratamientos

Tratamiento	Expansión (%) ¹
1	5.07 k
2	1.07 l
3	17.93 a
4	6.10 i
5	17.33 b
6	5.20 j
7	16.85 c
8	9.46 g
9	11.03 d
10	8.03 h
11	9.97 e
12	9.47 f
Promedio Global	9.792
DMS ²	0

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

La relación de expansión entre el extrudido y el diámetro del dado del extrusor en el proceso de extrusión se encuentra determinado principalmente por la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ adicionado, el porcentaje de humedad y la velocidad del tornillo (Zazueta-Morales et al., 2002), así como el diseño del tornillo, la restricción del dado y el gradiente de temperatura. (Serna-Saldivar, 1996).

González (1984), reporta que al incrementarse la humedad y la temperatura, así como cuando se presenta en el proceso altas humedades (30 %) los factores temperatura y tasa de compresión (originada a través del tornillo del extrusor) no presenta una mayor influencia en la expansión. Durante el proceso de extrusión el agua adicionada a la muestra funciona como lubricante, lo que en algunos casos evita la expansión del producto por temperaturas arriba de los 100 °C.

A bajos contenidos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (0.1-0.2 %) utilizados en el proceso de extrusión originan altos porcentajes de expansión (Zazueta-Morales et al., 2001). Faubion et al. (1982) mencionan que el color del extrudido es influenciado por el pH, por lo que el uso de altas concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da como resultado extrudidos oscuros, esto probablemente debido al incremento de la caramelización de los carbohidratos.

Camire and Clydesdale (1981), mencionan que a 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, ya que este complejo calcio-almidón restringe la salida interna de la humedad, una vez que el producto emerge del dado. Kervinen et al. (1984), mencionan que en condiciones alcalinas se reduce el índice de expansión debido al decremento del peso molecular del almidón.

La variedad de maíz empleado, es otro factor que influye en la expansión y el color del extrudido. Leal-Diaz et al. (2003), mencionan que la harina de maíz integral que se somete al proceso de extrusión presenta una mayor

expansión que el obtenido de harina maíz integral de calidad proteica (MCP), esto es debido a que el maíz MCP presenta un mayor contenido de lípidos que trabajan como lubricantes decreciendo la fricción al interior del cañón lo que hace que la expansión disminuya además de presentar una coloración mas clara.

Caracterización de la harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión

Humedad de la Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión (HUH)

En la Tabla 9, se presenta el análisis de varianza del porcentaje de humedad en la harina acondicionada (HUH) a un valor de F (1053.58) altamente significativo ($p \leq 0.01$). A su vez se observa (Tabla 10) un promedio global de 4.46 % y no se presenta una diferencia significativa (DMS= 0.24) entre los tratamientos que se acondicionaron a una humedad de 31 % (tratamientos 2,4,5,6 y 8). La muestra comercial presentó una humedad de 9.44 %. Las diferencias de humedad encontradas entre las HMNE y HMNC presentan relación con el índice de tamaño de partícula, esto puede deberse a que la superficie disponible del grano molido influye durante la determinación de humedad esto es que a un tamaño de partícula menor, el área expuesta se incrementa.

La incorporación de agua a la harina de maíz molido tiene diversas funciones entre las que se encuentra el incrementar la vida útil del equipo, al ingresar el material crudo que generalmente se encuentra en forma cristalina o en menor proporción amorfa se da un mayor desgaste del equipo, por lo que al incrementar la humedad de la harina acondicionada se disminuye su efecto abrasivo al paso de la muestra a través del cañón del extrusor (Mian, 2000).

En el presente estudio se observó que los resultados obtenidos de humedad de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión (HMNE) esta

Tabla 9. Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la Humedad de la Harina e Índice de Tamaño de Partícula de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F	
		Humedad de la Harina	Índice de Tamaño de Partícula
Tratamiento	12	1053.58***	3.29**
Error	26		
Total	38		

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

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

Tabla 10. Valores Promedio de la Humedad de la Harina e Índice de tamaño de Partícula

Tratamiento	Humedad de la Harina ¹	Índice de Tamaño de Partícula ¹
1-	3.87 e,d	71.69 b,a,c-
2-	4.39 b	72.06 b,a,c-
3-	3.70 e	72.67 b,a,c-
4-	4.51 b	71.29 b,a,c-
5-	4.33 b	70.99 b,a,c-
6	4.34 b	67.65 b,c
7-	3.36 f	70.32 b,a,c-
8	4.46 b	66.11 c
9-	4.00 d	68.95 b,a,c-
10-	4.08 c,d	72.28 b,a,c-
11-	3.25 f	70.10 b,a,c-
12	4.30 c,b	76.51 a
HCOM	9.44 a	75.52 b,a* 48.59
Promedio Global	4.4661	71.2425
DMS ²	0.2453	8.0478

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

relacionada también con el índice de absorción de agua (IAA), ya que harinas que reportaron mas humedad presentaron un menor IAA .

Índice de Tamaño de Partícula (ITP)

El análisis de varianza para ver las diferencias entre tratamientos sobre el índice de tamaño de partícula (ITP) se muestra en la Tabla 9, el tratamiento afecto de una manera significativa ($p \leq 0.05$) a un valor de F (3.29). En la Tabla 10 se muestra el promedio global que fue de 71.24 y no se presenta una diferencia (DMS= 8.04) entre los tratamientos específicos, aquellos con mayor uniformidad en el proceso de molienda (tratamientos 1,2,3,4,5,7, 9, 10 y 11) presentaron valores similares, a diferencia de la muestra comercial en donde el ITP fue mayor. El valor máximo se presenta a condiciones de H=29 %, T=130 °C y VT=100 rpm, así como el mínimo a las condiciones de operación mas altas (H=31 %, T=140 °C y VT=115 rpm).

Tanto la harina comercial (HMNC), como las nixtamalizadas por extrusión (HMNE) 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 (250 μm).

La distribución de tamaño de partícula (DTP) obtenida de las HMNE presentaron una mayor retención (55.2-68.5 ,12.5-20.6 y 10.04-17.6 %) en los números de malla 60, 80 y 100 (250, 177 y 149 μm , respectivamente). La muestra de harina comercial (HMNC) presento una mayor distribución en los números de malla 60, 80 y menor en la malla 100 así como una distribución mas homogénea en el resto de las mallas, lo que nos indica que la HMNC puede presentar diferente funcionalidad (Gómez *et al.*, 1987; Sahai *et al.*, 2001). Bedolla y Rooney (1984) reporta que la DTP de harinas comerciales elaboradas en México (Mex) y los Estados Unidos (E.U.A) presentaron similitud en mallas

de número 60, 80 y 100 (32, 37 y 25 %, respectivamente), obteniendo así una distribución uniforme aceptable para tortillas de mesa.

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). Martínez-Flores *et al.* (1998) menciona que el genotipo de maíz, el tipo de molino y abertura de malla influyen en la calidad de la masa y la tortilla.

Gómez *et al.* (1992), menciona que las tortillas requieren ser hechas de harinas con partículas finas para que estas presenten cohesividad en la masa y una aceptable rollabilidad e inflado en el producto final, por lo que partículas gruesas pueden reducir el inflado en la cocción, lo cual guarda relación con la tendencia que se presenta en los resultados. Al utilizarse el molino de martillo se obtiene una harina más fina que el obtenido con un molino de cuchillas a un mismo tipo de malla (Arambula *et al.*, 1998), con lo que se puede suponer que las diferencias encontradas en la DTP así como en el ITP, pueden deberse a operaciones en el proceso, principalmente en la molienda.

Densidad Aparente (DAP)

Se llevo a cabo el análisis de varianza que se muestra en la Tabla 11 para ver las diferencias entre los tratamientos sobre la DAP con un valor de F (34.82) significativo ($p \leq 0.05$). En la Tabla 12 se muestra un promedio global de 0.64 g/cm^3 y no se presenta una diferencia significativa ($DMS = 0.049$) entre los tratamientos a diferencia de la muestra comercial en donde la DAP fue menor (0.47 g/cm^3). El valor máximo (0.69 g/cm^3) se presenta a operaciones del proceso de $H=31 \%$, $T=120 \text{ }^\circ\text{C}$ y $VT = 85 \text{ rpm}$, así como el valor mínimo (0.61 g/cm^3) a $H=27 \%$, $T=140 \text{ }^\circ\text{C}$ y $VT=115 \text{ rpm}$.

Tabla 11. Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre la Densidad Aparente y pH de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F	
		Densidad Aparente	pH
Tratamiento	12	34.82***	41.07***
Error	26		
Total	38		

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

Tabla 12. Valores Promedio de la Densidad Aparente y el pH

Tratamiento	DAP ¹	pH ¹
1	0.65 b,a,c	6.82 d
2	0.69 a	6.83 c,d
3	0.66 b,a,c	6.96 b
4	0.65 b,a,c	6.87 b,c,d
5	0.68 a	7.06 a ✗
6	0.66 b,a,c	6.83 c,d
7	0.61 c	6.89 b,c,d
8	0.66 b,a,c	6.93 b,c
9	0.67 b,a	6.84 c,d
10	0.64 b,c	6.92 b,c,d
11	0.64 b,c	6.97 b,a
12	0.67 b,a	6.93 b,c
HCOM	0.47 d	6.50 e ✗
Promedio Global	0.6453	6.8771
DMS ²	0.0491	0.1056

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

Los valores obtenidos en la HMNC presentan similitud a los reportados por Bedolla and Rooney (1984), con valores de densidad en harina comercial de 0.387-0.449 g/mL (elaborada en los EUA) y 0.385-0.448 g/mL (elaborada en México), así como los resultados obtenidos por Flores-Farias *et al.* (2002) donde se mencionan valores de tres distintas harinas comerciales en un rango de 0.38 a 0.44 g/mL.

Lo que nos indica que el proceso de secado y molienda fue similar para todos los tratamientos de las HMNE obtenidas. Así como un menor valor en la HMNC debido al tipo de molienda y cribado empleado (Flores-Farias *et al.*, 2002; Gómez *et al.*, 1992 y Arambula *et al.*, 1998). Bedolla y Rooney (1984) mencionan, que un mayor tamaño de partícula resulta en una alta densidad, esto corrobora que el tamaño que presenta la HMNE ocupa un mayor volumen tomando en cuenta los espacios existentes entre las partículas.

Leal-Díaz *et al.* (2003) menciona que partículas provenientes de grano decorticado presentan una baja densidad, en comparación con partículas más gruesas de maíces a los que se sometió un decorticado medio o a los que no se les decortico, por lo que es posible que la HMNE obtenidas en el presente estudio al contener el pericarpio, este influya dando una mayor densidad.

pH

Las diferencias entre los tratamientos sobre el pH fueron observadas gracias a el análisis de varianza que se presenta en la Tabla 11, en donde el tratamiento afecto de manera significativa ($p \leq 0.05$) a un valor de F de 41.07. En la Tabla 12 se presenta el promedio global del pH que fue de 6.87 g/cm³ y no se observa una diferencia significativa (DMS= 0.10) entre los tratamientos específicos, sin embargo el valor máximo (7.06) y mínimo (6.50) que corresponde al tratamiento 5 y la HMNC si presentaron diferencia. El maíz molido presento un valor (6.3) por abajo del resto de las HMNE esto es debido a la incorporación de cal durante el acondicionamiento.

Flores-Farias *et al.* (2000) reporta valores de pH en harina de maíz comercial a un rango de 6.2 - 6.9, presentando similitud tanto en los datos obtenidos en las HMNE y HMNC evaluadas. Faubion *et al.* (1982) menciona que a bajos pH (3.0 a 3.4), la salida del producto y el consumo de energía fue reducido, probablemente se debe a una baja viscosidad del almidón disuelto debido a una hidrólisis parcial.

La retención del pericarpio en el producto final (tortilla) puede resultar en una cohesividad deseable, esto es debido a la presencia de gomas naturales y posiblemente en obscurecimiento (indeseable) debido a la presencia de los pigmentos y cal atrapada en las gomas que tienden a incrementar el pH (Almeida y Rooney.,1996).

Martínez-Bustos *et al.* (1998) reportan que a niveles de 0.25 % y menores de hidróxido de calcio, se presentan mejores valores de IAA e IMS, un incremento en la cristalinidad de los gránulos de almidón así como la formación de complejos calcio-almidón, en el proceso de elaboración de HMNE. La solubilidad y grado de polimerización esta influenciado por el pH en la extrusión (Faubion *et al.* 1982).

El color es también influenciado por el pH ya que al aumentar se incrementa el color oscuro en los productos extrudidos, probablemente por la caramelización de los carbohidratos a altos valores de pH (Faubion, 1982). La acción combinada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y las condiciones de extrusión incrementan la coloración amarilla en la harina, así como los cambios estructurales.

El sabor de las harinas extrudidas varía con cambios en el pH, ya que a niveles de 0.1-0.2 % de cal, no cuentan con sabor alcalino tradicional que puede ser debido a una degradación parcial de las moléculas de almidón, así como una saponificación de la fracción lipídica, sin embargo a niveles mayores de cal se percibe el olor y sabor (Bedolla y Rooney ,1984).

Índice de Material Soluble

El análisis de varianza para ver las diferencias entre tratamientos sobre el índice de tamaño de partícula (ITP) se muestra en la Tabla 13, el tratamiento afecto de una manera muy significativa ($p \leq 0.01$) a un valor de F (7.23). En la Tabla 14 se observa un promedio global de 5.46 y no se presenta una diferencia entre los tratamientos 2,4,9 y 12 (a humedades altas e intermedias y velocidades de tornillo bajas e intermedias), así como en los tratamientos 5,7 y 10 (humedades bajas y velocidades del tornillo altas), en el resto de los tratamientos si se presentó diferencia (DMS= 1.28). La muestra comercial (HMNC) presentó un IMS menor (3.93).

El índice de material soluble (IMS) es un parámetro indicativo de la cantidad de material que es disuelta por el agua cuando una muestra de harina se somete a un exceso de este líquido. El IMS es utilizado como un parámetro de calidad que nos indica el grado de cocimiento que presenta una harina. (González *et al.*, 1991).

Arambula *et al.* (1998) menciona que el aumento de humedad y temperatura produce un incremento en el IMS en el proceso de extrusión para la elaboración de HMNE y por lo tanto masas más adhesivas, esto nos indicaría una tortilla con mayor firmeza, debido principalmente al proceso de retrogradación después de 24 h de almacenamiento (Campas-Baypoli *et al.*, 1999, 2002). Además la presencia del pericarpio en las HMNE incrementa la cohesividad y el oscurecimiento, debido a la presencia de pigmentos y cal que queda atrapada (en gomas naturales del pericarpio) (Almeida y Rooney, 1996).

Tabla 13. Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto de los tratamientos sobre el Índice de Material Soluble de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F IMS
Tratamiento	12	7.23***
Error	26	
Total	38	

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

Tabla 14. Valores Promedio del Índice de Material Soluble

Tratamiento	IMS ¹
1	6.88 a
2	5.69 b,a
3	5.42 b
4	6.01 b,a
5	5.13 b,c
6	5.50 b
7	5.08 b,c
8	5.59 b
9	5.73 b,a
10	4.91 b,c
11	5.39 b
12	5.77 b,a
HCOM	3.93 c
Promedio Global	5.4656
DMS ²	1.287

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

Los valores del IMS en la HMNE obtenidos se encuentran dentro de los reportados por Flores-Farias *et al.* (2002) en harinas comerciales. El maíz molido presentó un IMS (9.53) por arriba de los obtenidos en la HMNE, esto puede deberse al efecto de molienda (Campas-Baypoli, 1997) y el calentamiento que se genera durante la operación. En el producto nixtamalizado un grado de molienda mayor afecta el IMS, por lo que masas con una DTP fina presentan altos IMS en comparación con masas de una DTP gruesa (Ramirez-Wong, 1989), otro factor que influye en el incremento del IMS es el mayor tiempo de cocimiento durante la nixtamalización (Gómez *et al.*, 1990).

Gómez *et al.* (1992) menciona que en los diferentes pasos de elaboración de la tortilla (almidón en maíz, nixtamal y masa) se incrementa la solubilidad de los componentes del almidón. Esto indica que tanto la gelatinización parcial como la retrogradación del almidón ocurren durante la elaboración de la harina de maíz nixtamalizada, Gómez *et al.* (1991).

González (1984), reporta que el incremento de la materia soluble se da con el aumento de la temperatura, la disminución de la humedad así como el incremento de la relación compresión-tensión, sin embargo a altas humedades la relación de compresión no incide en el IMS y de manera inversa influye a bajas humedades. Faubion *et al.* (1982), menciona que el IMS se incrementa en el proceso de extrusión a pH debajo de 4.0, el cual consiste en una hidrólisis parcial del almidón en un medio ácido.

Difracción de Rayos X (RX)

En la Figura 17 se muestran los diferentes patrones de difracción de rayos X de cada uno de los tratamientos de las harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión. Los gráficos presentaron cinco picos que corresponden a valores de espaciado interplanar (d) para las HMNE (5.81-5.89, 5.18, 4.92-4.98, 4.5, 3.89-3.93), HMNC (5.81, 5.18, 4.98, 4.92, 4.47, 3.89) y maíz molido (5.83,

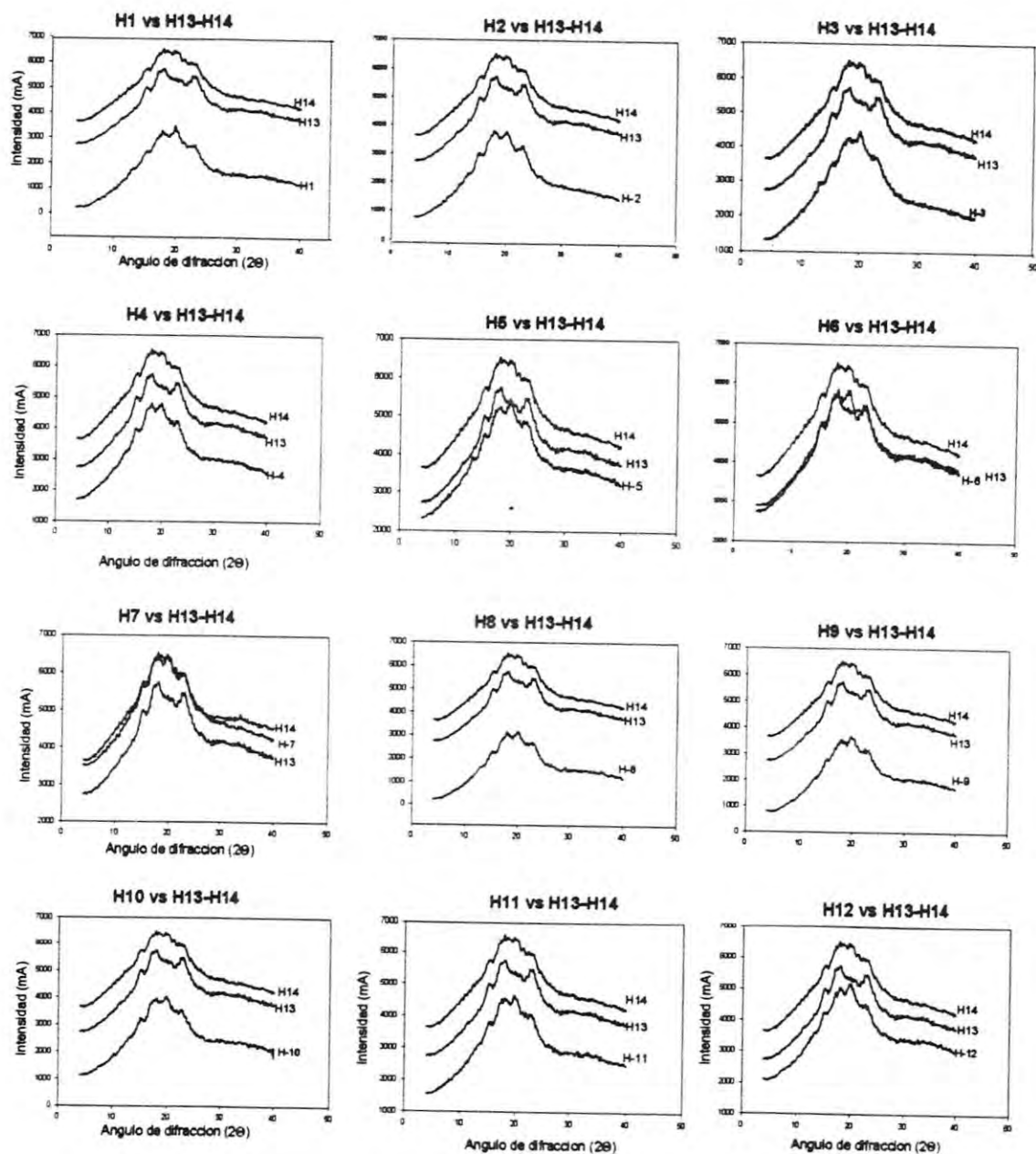


Figura 17. Difractogramas de las Harinas de Maíz Nixtamalizada por Extrusión (H1-H12) en comparación con las Harinas de Maíz Integral (H13) y Comercial (H14).

5.18, 4.92, 4.47, 3.89). Estos datos presentan similitud a los reportados por Campas-Baypoli *et al.* (1999), Rodríguez *et al.* (2001); Ramos (2004); Flores-Farias (2000); Charbonniere *et al.* (1973); para almidón de maíz, maíz, HMNC y HMNE. La tendencia que presentan los gráficos corresponde a un patrón de cristalinidad tipo A para cereales (Zobel, 1988).

Al comparar cada tratamiento con la harina integral y comercial, se observo que los tratamientos 5 (H=27 %, T=120 °C, VT=115 rpm) y 6 (H=31%, T=120 °C, VT=115 rpm) presentaron una intensidad cercana a la obtenida en la HMI, lo que nos indica que en estos tratamientos se presento un daño menor en el almidón, de manera opuesta el tratamiento 8 (H=31 %, T=140 °C, VT=115 rpm) en donde se tiene la menor intensidad, ya que al incrementarse la humedad en la muestra y ser expuestas a altas temperaturas, se presenta una gelatinización parcial (Gómez *et al.*, 1991) a un mayor grado que el resto de los tratamientos.

El tratamiento 7 (H=27 %, T=140 °C, VT=115 rpm) muestra un comportamiento similar al que se presenta en la HMNC, esto puede deberse a que al tener un menor porcentaje de humedad, las otras variables (temperatura y la velocidad del tornillo) presentaron un mayor efecto. Además del daño mecánico que se da durante la molienda y remolienda después del tamizado, lo que influye a que la cristalinidad del almidón disminuya mas a una partícula fina que a una gruesa en la elaboración de la HMNC (Gómez, *et al.*, 1991).

El resto de los tratamientos (1-4, 9-12) presentan una intensidad por debajo del que se observa en el maíz molido, lo que nos indica que conforme se incrementa la gelatinización la cristalinidad del granulo de almidón disminuye (Martínez-Serna *et al.*, 1992), sin embargo el efecto del cocimiento por extrusión sobre la organización estructural depende de la relación amilosa:amilopectina asi como de las variables utilizadas como la humedad, la fuerza de corte, temperatura y la interacción de estas variables (Zazueta-Morales, 2002).

Las HMNE y HMNC a un ángulo de difracción cercano a los 20° presenta un valor de intensidad máxima, a diferencia de la HMI en donde se presenta una intensidad mínima. Este comportamiento puede ser debido a que durante la nixtamalización al darse la gelatinización del almidón se puede formar los complejos de amilosa con lípidos (ácidos grasos y lisofosfolípidos), lo que disminuye el efecto de hinchamiento y solubilidad de los componentes del almidón (Mondragón *et al.*, 2004). Sin embargo a los 15 y 23 ° se muestra un decremento en la intensidad de las HMNE, esto puede ser debido a un arreglo de las moléculas de amilosa y amilopectina dentro del cañón, como un resultado de una tasa de corte y presión que se presentan durante el proceso de extrusión (Martínez-Serna *et al.*, 1992).

Caracterización de la masa elaborada con la harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión

Capacidad de Absorción de Agua Subjetiva (CAAS)

Se llevo acabo el análisis de varianza que se muestra en la Tabla 15 para ver las diferencias entre lo tratamientos sobre la CAAS, en donde se observa que esta determinación fue afectada muy significativamente ($p \leq 0.01$) por el tipo de tratamiento con un valor de F (infinito). En la Tabla 16 se presenta un promedio global de 95.84 mL agua/ g harina y no se presenta una diferencia significativa (DMS= 0) entre los tratamientos 4 y 8 (H= 31 %, T=140 °C, VT=85 rpm; H= 31%, T=140 °C, VT=115 rpm, respectivamente), sin embargo en los demas tratamientos si existe diferencia. Flores-Farias *et al.* (2002) mencionan que la CAAS nos indica la cantidad de agua que absorbe la harina para obtener un masa de consistencia adecuada para la preparación de la tortilla, además de ser un indicador del rendimiento de harina a masa.

Tabla 15. Análisis de Varianza, Valor de F, de la Capacidad de Absorción y la humedad en masa elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F	
		Capacidad de Absorción Subjetiva	Humedad en Masa
Tratamiento	12	Infinito***	2559.98***
Error	26		
Total	38		

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

Tabla 16. Valores Promedio de la Capacidad de Absorción de Agua Subjetiva y Humedad en masa.

Tratamiento	Capacidad de Absorción de Agua Subjetiva ¹	Humedad en Masa ¹
1	92.0 j	47.39 h
2	93.3 h	48.97 d
3	94.0 f	49.05 d
4	94.7 d	48.25 f
5	93.7 g	47.01 i
6	94.3 e	47.36 h
7	97.0 c	47.97 g
8	94.7 d	48.27 f
9	91.0 k	48.62 e
10	90.7 l	48.19 gf
11	97.7 b	52.93 c
12	93.0 i	53.72 b
HCOM	120.0 a	54.34 a
Promedio Global	95.8469	49.3930
DMS ²	0	0.2563

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

Con respecto a el maíz molido presento un valor (70.6 g /ml agua) por debajo de los obtenidos en las HMNE y la HMNC, esto es debido principalmente a que durante el proceso de nixtamalización se da una gelatinización parcial de los gránulos de almidón con lo cual se favorece la capacidad de absorción, ya que el maíz integral presenta una estructura de almidón nativo, en donde la difusión del agua es limitada (Campas-Baypoli *et al.*, 1999).

La muestra comercial (HMNC) presento una CAAS (120 g /mL agua) similar a los datos reportados por Flores-Farias (2002) en distintas HMNC (120-135 g /mL agua). La diferencia existente entre la CAAS de las HMNE y HMNC es debido probablemente a esta ultima cuenta con aditivos (gomas) que incrementan su capacidad de retención de agua (Flores-Farias *et al.*, 2002; Fonseca, 2004). Bedolla y Rooney (1984) mencionan valores de absorción subjetiva de harinas comerciales elaboradas en México y los E.U, con una relación agua: harina de 0.9 a 1.3, mientras que los datos obtenidos de la HMNE en el presente estudio muestran una relación cercana de 0.9 a 0.97.

Humedad en Masa (HUMA)

Las diferencias entre los tratamientos sobre la HUMA fueron observadas gracias a el análisis de varianza que se presenta en la Tabla 15, en donde el tratamiento afecto de manera muy significativa ($p \leq 0.05$) a un valor de F de 2259.58. En la Tabla 16 se muestra un promedio global de 49.39 % y no se presenta una diferencia significativa (DMS= 0.2563) entre los tratamientos 2,3 (H= 31%, T=120 °C, VT=85 rpm; H= 27 %, T=140 °C, VT=85 rpm, respectivamente); 8, 4 (H= 31 %, T=140 °C, VT=115 rpm; H= 31 %, T=140 °C, VT=85 rpm, respectivamente) y 1,6 (H= 27 %, T=120 °C, VT=85 rpm; H= 31 %, T=120 °C, VT=115 rpm, respectivamente).

Los contenidos de humedad obtenidos de masas elaboradas con la HMNE presentan valores similares a los reportados en nixtamal de maíz normal

(Bedolla and Rooney, 1984; Campas-Baypoli, 1997), MCP (Pons, 1994) masa (Miklus and Hamaker, 2003) y masa obtenida por el proceso de extrusión (Arambula-Villa, 2000). Las diferencias marcadas entre las humedades en las masas obtenidas se deben principalmente a la CAAS de la harina. Bedolla and Rooney (1984) mencionan que la capacidad de retención de agua en masa estima que tan cohesiva (maquinable) es la masa así como de manera indirecta el rendimiento estimado de tortillas.

Gómez *et al.* (1991) reportan un contenido de humedad en masa para la producción de tortillas de maíz en un rango de 52-55 %. Bedolla and Rooney (1982) menciona un rango de 52-69 %. En otro estudio Ramírez-Wong *et al.* (1993), reporta que se obtuvieron tortillas con características aceptables a una humedad en la masa de 56 %. Las diferencias entre las humedades de masas elaboradas con HMNE obtenidas en el presente estudio y los datos reportados en literatura pueden ser debido principalmente a que la humedad de la masa aumenta ligeramente con la adición de agua que es agregada de manera subjetiva durante el amasado (Campas-Baypoli, 1997; Ramirez-Wong, *et al.*, 2002) y en la molienda (en molino de piedra) al obtenerse bajo el método tradicional.

La capacidad de retención de agua en la masa se encuentra estrechamente relacionado con la dureza, adhesividad y el factor de compresión tensión (Ramírez-Wong 1989), lo que nos indica que masas con una alta humedad pueden originar masas adhesivas, poco duras y con bajos valores del factor compresión tensión. Al incrementarse la velocidad del tornillo y el contenido de humedad resultan bajos valores de dureza en masa obtenidas por el proceso de extrusión (Vargas López *et al.*, 1991).

La presencia del pericarpio en la harina de maíz nixtamalizado por el proceso de extrusión incrementa sus propiedades funcionales de la masa así como la absorción de agua, este es debido a que al nixtamalizarse el pericarpio

libera gomas compuestas (D-xilanosas, D-ácido glucoronico y residuos de D-galactosa) que son los principales componentes de las propiedades texturales de masas y tortillas (Martínez-Bustos *et al.*, 1999). Las hemicelulosas solubles en alcali muestran interesantes propiedades funcionales de adhesividad, estabilidad y grosor (Wolf *et al.*, 1953). Por lo que masas elaboradas de granos de maíz decorticado originan masas pegajosas y con características pobres de maquinabilidad (Martínez-Bustos *et al.*, 2000).

En la producción de harina instantánea de harina de maíz nixtamalizado se presenta un contenido de humedad que puede ir desde 39 % hasta 50 % (Lloyd and Sotres, 1952). La masa elaborada con la HMNC presento una mayor humedad, esto puede ser debido a que la distribución de tamaño de partícula es menos gruesa (Ramírez-Wong, 1989), así como el uso de aditivos (gomas), lo cual incrementa su capacidad de absorción de agua (Bedolla and Rooney 1984; Rubio, 1993; Larios 2004; Flores-Farias 2000 y 2002).

Caracterización de la Tortilla elaborada con la Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión

Características Físicas de las Tortillas

Las características físicas de las tortillas evaluadas en el presente estudio fueron peso (PT), diámetro (DT) y espesor (ET) a 2, 24 y 48h de elaboración. El análisis de varianza para ver las diferencias entre tratamientos sobre las características físicas de las tortillas a 2 h de elaboración (tiempo en el que son consumidas principalmente) se muestra en la Tabla 17, el tratamiento afecto de una manera muy significativa ($p \leq 0.01$) a un valores de F en PT, DT y ET (36.91, 6.31, 12.49, respectivamente). En la Tabla 18 se presenta una baja diferencia significativa (DMS = 0.36, 0.36 y 0.15) entre los tratamientos. El peso

Tabla 17. Análisis de Varianza, Valor de F, del peso , diámetro y espesor de la tortilla elaborada con harina nixtamalizada por extrusión a las 2h de almacenamiento.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (mm)
Tratamiento	12	36.91***	6.30***	12.49***
Error	26			
Total	38			

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

Tabla 18. Valores Promedio de las del peso , diámetro y espesor de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión a las 2h de almacenamiento.

Tratamiento	Peso (g) ^{1,2}	Diámetro (cm) ^{1,2}	Espesor (mm) ^{1,2}
1	16.02 b,a,c	11.00 e,d	1.57 b,a
2	15.22 d	11.16 e,b,d,a,c	1.55 b,a
3	15.85 c	11.11 e,b,d,c	1.60 a
4	15.91 b,c	11.21e,b,d,a,c	1.43 b,c
5	16.25 b,a	11.15 e,b,d,a,c	1.56 b,a
6	15.88 c	11.43 b,a	1.38 d,c
7	15.88 c	11.21 e,b,d,a,c	1.49 b,a,c
8	15.93 b,c	11.33 b,d,a,c	1.56 b,a
9	16.37 a	11.06 e,d,c	1.52 b,a,c
10	15.91 b,c	11.00 e,d	1.51 b,a,c
11	15.98 b,c	11.36 b,a,c	1.57 b,a
12	15.33 d	10.91 e	1.60 a
HCOM	14.82 e	11.50 a	1.22 d
Promedio		11.1910	1.5092
Global	15.7982		
DMS ³	0.3612	0.3634	0.1572

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² Características físicas de la tortilla a 2 h de almacenamiento

³ DMS= Diferencia mínima significativa

de las tortillas tuvo un promedio de 15.79 g, un diámetro de 11.19 cm y un espesor de 0.15 cm (1.5 mm).

En la Figura 18 se presentan las características físicas de la tortilla elaborada con HMNE, se puede observar que tanto peso, diámetro y espesor entre los tratamientos y tiempos de almacenamiento mostraron una tendencia muy similar, lo que nos indica que las tortillas elaboradas con HMNE presentaron homogeneidad en su elaboración, así como las condiciones de almacenamiento fueron las mismas para todos los tratamientos. Los valores obtenidos de las tortillas elaboradas con HMNC se encontraron por debajo de los obtenidos en la HMNE, esto puede deberse principalmente a que la distribución del tamaño de partícula, ya que harinas con una distribución de partícula más uniforme se obtienen tortillas más aceptables (Bedolla and Rooney, 1982).

Los valores promedio obtenidos de peso, diámetro y grosor en tortillas se encuentran cercanos a los valores reportados por Ramírez-Wong (1989), Vásquez (1995), Campas (1997) y Ramos (2004), en donde se obtuvieron tortillas con buenas características. Las principales diferencias entre las características físicas de las tortillas elaboradas con HMNE y las reportadas en literatura se deben principalmente al método de elaboración utilizado (San Martín-Martínez *et al.*, 2003).

Tortillas con un mayor espesor, peso y humedad presentan una menor flexibilidad (Suhero *et al.*, 1998), esto puede ser debido a que masas con mayor capacidad de retención (que el óptimo) presentan más adhesividad lo que hace difícil que en su elaboración su espesor sea delgado. Harinas con un tamaño de partícula mayor originan masas con una menor cohesividad y tortillas menos flexibles (Bedolla 1984), esto corrobora el comportamiento de la HMNC evaluada, ya que al contar con un tamaño de partícula menor presentan tortillas con menor peso y grosor.

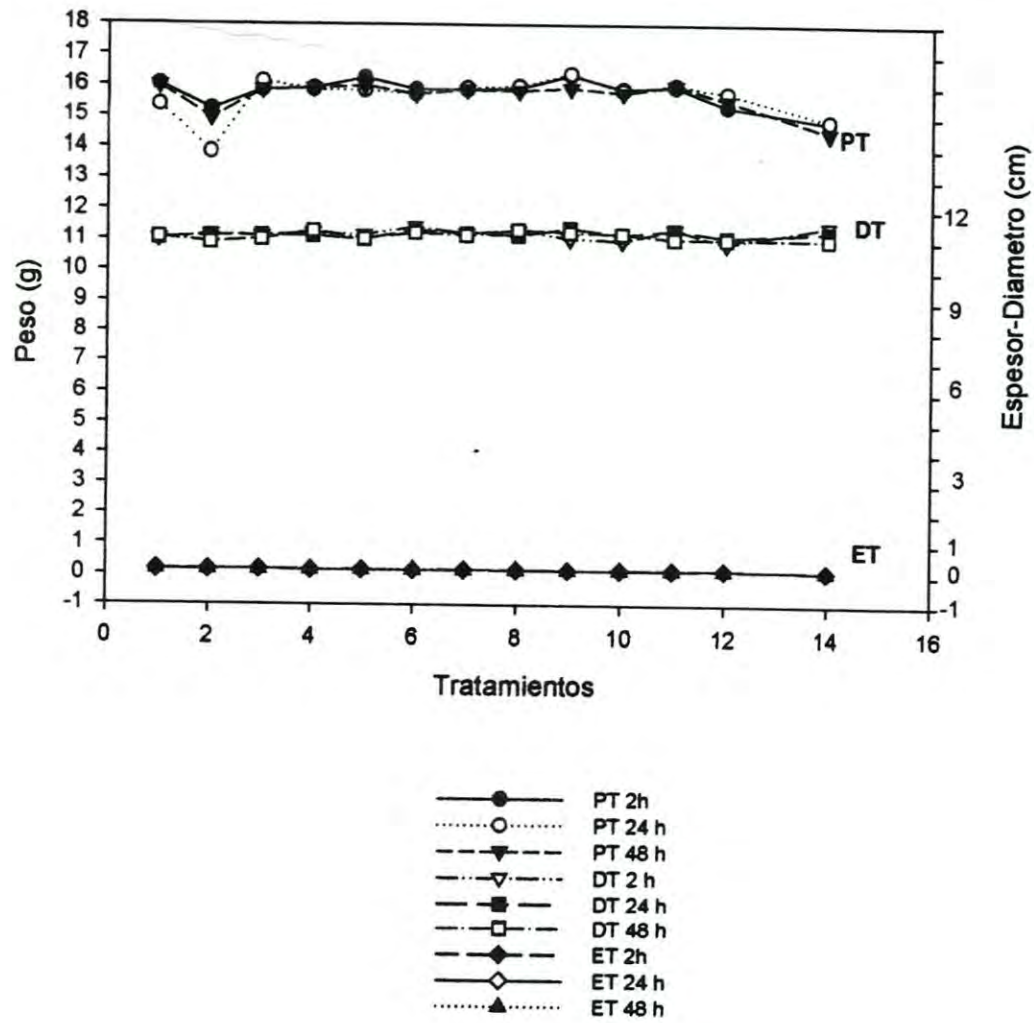


Figura 18. Comportamiento del peso (PT), diámetro (DT) y espesor (ET) de la tortilla elaborada con HMNE a 2, 24 y 48h de almacenamiento.

La HMNC presento menor perdida de agua, debido a que el diámetro del disco de masa fresca disminuyo 1cm después del horneado, a diferencia de la HMNE en donde el diámetro reducido fue mayor, esto es debido a que la HMNC presenta aditivos (gomas) que le proporcionan a la tortilla una mayor capacidad de retención de agua y mejores características texturales (Fonseca, 2004).

Inflado

El análisis de varianza para ver las diferencias entre tratamientos sobre el índice el Inflado se muestra en la Tabla 19, el tratamiento afecto de una manera muy significativa ($p \leq 0.01$) a un valor de F (infinito). En la Tabla 20, se observa un promedio global de 1.18 y no se presenta una diferencia significativa (DMS= 0) entre los tratamientos 1 y 7; 3 y 10; 4, 11 y 12; 2 y HMNC. El inflado se incrementa conforme se presenta en la harina un menor tamaño de partícula en mejor distribución Gómez *et al.*, (1987), como en el caso de la HMNC , por lo que a un mayor tamaño de partícula se presenta un menor inflado, sin embargo para todos lo tratamientos se obtuvo un buen inflado durante su cocción.

El inflado es una estimación subjetiva que se le da a la tortilla durante el horneado (Arambula, *et al.*, 1998) y que es utilizado como parámetro de calidad (Gómez *et al.*, 1987). El incremento de la humedad en harina de maíz (capacidad de absorción de agua) obtenida por extrusión asi como en la temperatura del procesamiento en la elaboración de tortillas incrementan la adhesividad de las masas y el inflado. Gómez *et al.* (1987), menciona que la fracción fina que compone el total de partículas en la harina es la principal responsable en la formación del inflado en tortillas, por lo que las HMNE a pesar de contener una distribución de tamaño de partículas finas distintas a la HMNC presentaron buen inflado.

Tabla 19. Análisis de Varianza, Valor de F, del Inflado de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F Inflado
Tratamiento	12	Infinito ***
Error	26	
Total	38	

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

Tabla 20. Valores Promedio del Inflado de las tortillas elaboradas con harina nixtamalizada por extrusión.

Tratamiento	Inflado ¹
1	1.14 e
2	1.29 d
3	1.00 h
4	1.05 g
5	1.48 a
6	1.43 b
7	1.14 e
8	1.33 c
9	1.10 f
10	1.00 h
11	1.05 g
12	1.05 g
HCOM	1.29 d
Promedio Global	1.1807
DMS ²	0

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p<0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

En el tercer paso durante la cocción de la tortilla (posterior al calentamiento en los dos pasos anteriores) se aplica suficiente calor para la producción de vapor de agua en la pieza y por lo tanto se da el inflado en la tortilla (Almeida and Rooney, 1996), por lo que es importante que durante el formado del disco de masa no se presenten ranuras dentro de la superficie del disco que disminuyan el inflado.

Rollabilidad

Las diferencias entre los tratamientos sobre la Rollabilidad en la tortilla elaborada con HMNE a 2 h, 24 h y 48 h fueron observadas gracias a el análisis de varianza que se presenta en la Tabla 21, en donde el tratamiento afecto de manera muy significativa ($p \leq 0.01$) a un valor de F para las evaluaciones hechas a 24h (7.53) y 48 H (17.63). En la Tabla 23 se observa un promedio global de 4.84, 3.45 y 2.94 respectivamente. A las 2 h en la elaboración de la tortilla no se presento diferencia significativa (DMS= 1.06) en comparación con las muestras evaluadas a 24 h donde existió una diferencia significativa (DMS= 1.36) entre los tratamientos 7,8 y 4,5,6,12. A 48 h se dio una diferencia (DMS= 1.21) en los tratamientos 6 y 7 a diferencia del resto.

Los valores promedio obtenidos de rollabilidad en tortilla elaboradas con HMNE presentan similitud a los datos reportados en literatura (Bedolla and Rooney.,1984; Ramírez-Wong y Ortega.,1994; Arambula *et al.*, 1998; Suhedro *et al.*, 1998; Deborah *et al.*,1999; Martínez-Bustos *et al.*,2000; Flores-Farias *et al.*, 2000) dentro de las 2, 24 y 48 h de almacenamiento.

A partir de las 24 h de almacenamiento de la tortilla elaborada con HMNE se observo una disminución de la rollabilidad a diferencia de las 2 h de almacenamiento en donde no se presento diferencia entre los tratamientos (Fig. 19). A las 48 h de almacenamiento se presento un decremento de la rollabilidad, lo que nos indica que conforme se incrementa el tiempo de almacenamiento se

Tabla 21. Análisis de Varianza, Valor de F, de la rollabilidad a 2h (A), 24h (B), y 48h (C) y de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		Rollabilidad 2h	Rollabilidad 24 h	Rollabilidad a 72 h
Tratamiento	12	1.13 ^{NS}	7.53 ^{***}	17.63 ^{***}
Error	26			
Total	38			

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

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

Tabla 22. Análisis de Varianza, Valor de F, de la Firmeza a 2h , 24h y 48h de la tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F		
		Firmeza 2h	Firmeza 24h	Firmeza 48h
Tratamiento	12	9.35 ^{***}	4.57 ^{**}	3.70 ^{**}
Error	26			
Total	38			

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

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

Tabla 23. Valores Promedio de Rollabilidad y Firmeza de las tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2, 24 y 48 h

Tratamiento	Rollabilidad	Firmeza (kg g) ¹
Tiempo = 2h		
1	4.66 a	26.28 c,d
2	5.00 a	31.87 b,c,d
3	5.00 a	30.07 b,c,d
4	5.00 a	35.38 b
5	4.66 a	36.32 b,a
6	4.66 a	28.42 b,c,d
7	4.66 a	33.72 b,c
8	5.00 a	35.42 b
9	5.00 a	32.00 b,c,d
10	5.00 a	45.07 a
11	4.66 a	33.68 b,c
12	5.00 a	37.14 b,a
HMNC	5.00 a	24.27 d
Promedio Global	4.8461	33.0528
DMS ²	1.0624	8.9389
Tiempo = 24h		
1	4.00 b,a,c	44.91 b,a
2	3.66 b,d,a,c	55.72 a
3	3.00 b,d,c	43.73 b,a
4	4.00 b,a,c	49.32 b,a
5	3.86 b,a,c	61.38 a
6	3.77 b,a,c	47.13 b,a
7	2.33 d	45.907 b,a
8	2.31 d	54.93 a
9	3.22 b,d,c	44.01 b,a
10	3.10 b,d,c	63.25 a
11	2.77 d,c	49.06 b,a
12	4.20 b,a	56.38 a
HMNC	4.66 a	27.59 b
Promedio Global	3.4551	49.4892
DMS ²	1.363	22.271
Tiempo = 48 h		
1	3.66 b,a	54.27 a
2	3.33 b,a,c	66.38 a
3	3.66 b,a	47.74 b,a
4	1.88 e,d	47.65 b,a
5	3.26 b,c	58.65 a
6	1.22 e	51.05 b,a
7	1.33 e	53.46 a
8	2.66 b,d,c	64.10 a
9	3.33 b,a,c	51.10 b,a
10	2.33 e,d,c	59.13 a
11	3.55 b,a	48.37 b,a
12	3.55 b,a	57.01 a
HMNC	4.50 a	24.78 b
Promedio Global	2.9453	52.5961
DMS ²	1.2116	27.472

¹ Valores con letras iguales dentro de una columna no son estadísticamente diferentes a un nivel de 0.05 ($p < 0.05$).

² DMS= Diferencia mínima significativa

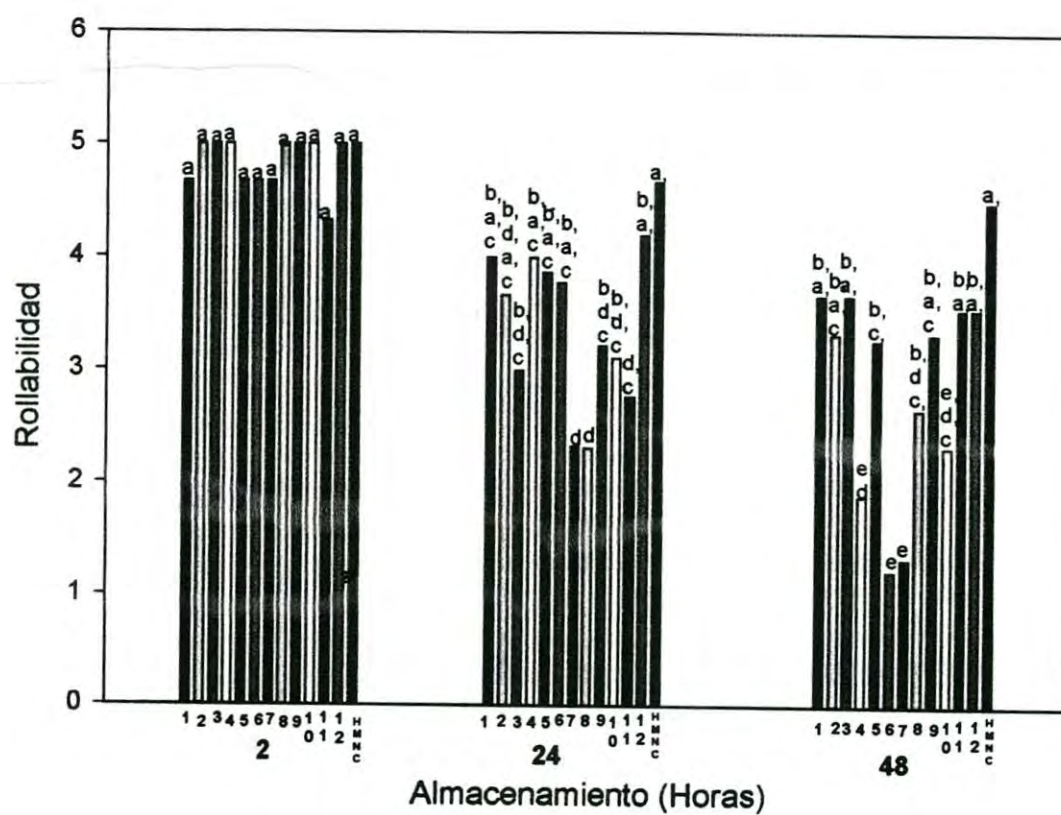


Figura 19. Rollabilidad en tortilla elaborada con harina de maíz nixtamalizada por extrusión a 2h, 24 h y 48 h de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C).

disminuye la flexibilidad de la tortilla (Suhedro *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 1999).

Las tortillas elaboradas con HMNC no presentaron una disminución drástica (alrededor del 10 %) en el enrollamiento a diferentes tiempos de almacenamiento, esto puede ser debido a que se presenta una distribución del tamaño de partícula mas fina lo que proporciona cohesividad en la masa Gómez *et al.* (1992), así como la incorporación de aditivos que le confieren una mayor flexibilidad y por lo tanto un buen enrollamiento en la tortilla.

En algunos tratamientos se puede observar un comportamiento un ligera tendencia ascendente a los 48 h de almacenamiento, esto puede deberse a la presencia de un reblandecimiento de la tortilla debido a la condensación, lo que puede iniciar la descomposición del producto. Otro factor fue sin duda es la medición elaborada de manera subjetiva a diferentes tiempos en cada tratamiento, lo cual pudo influir en la asignación de valores dentro de la escala.

Suhedro *et al.* (1998) menciona que el espesor de la tortilla influye en la rollabilidad, ya que tortillas con un mayor espesor requieren de una mayor fuerza para ser enrolladas y su efecto es mas notorio cuando las tortillas son almacenadas por 24 h, por lo que las tortillas con menor espesor presentan una menor fuerza al enrollamiento así como una mejor rollabilidad, lo que se traduce en una tortilla mas flexible.

El uso del grano entero da mejores propiedades de rollabilidad, esto puede ser atribuido a la presencia de gomas presentes en el pericarpio, por lo que en granos decorticados se reducen las propiedades texturales de la masa y la tortilla (Martínez-Bustos *et al.*, 2000).

Firmeza

Las diferencias entre los tratamientos sobre la Firmeza en la tortilla elaborada con HMNE a 2 h, 24 h y 48 h, fueron observadas gracias a el análisis de varianza que se presenta en la Tabla 22, en donde el tratamiento afecto de manera muy significativa ($p \leq 0.01$) a un valor de F para la evaluación hecha a 2 h (9.35) y significativo ($p \leq 0.05$) a 24 h (4.57) y 48 h (3.70). En la Tabla 23 se tiene un promedio global de 33.05, 49.48 y 52.59 kg_f respectivamente. A 2 h de almacenamiento solo se presento diferencia significativa (8.93) con el tratamiento al valor máximo (45.07 kg_f) a condiciones de procesamiento de H=29 %, T=130 °C y VT=100 rpm (tratamiento 10), salvo con lo tratamientos 5 y 12, así como la HMNC no presento diferencia con el valor mínimo (26.28 kg_f) (tratamiento 1) a condiciones de H=27 %, T=120 °C y VT=85 rpm, así como los tratamientos 2,3,6 y 7. A 24 h de almacenamiento no se presento diferencia significativa (22.27) y se obtuvo un máximo de 63.25 kg_f (tratamiento 10) y el mínimo 43.73 kg_f correspondientes al tratamiento 3 (H= 27 %, T= 140 °C y VT=85 rpm). Para las 48 h no se presento diferencia significativa (27.47), salvo la HMNC con los tratamientos 1,2,5,7,8, 10 y 12; el máximo (66.38 kg_f) y el mínimo (47.74 kg_f) se presentaron en los tratamientos 1 y 4 (H=31 %, T=140 °C y VT=85 rpm) respectivamente.

Los valores promedio obtenidos de firmeza en tortilla elaboradas con HMNE presentan similitud a los datos reportados (Ramírez-Wong y Ortega., 1994; Arambula *et al.*, 1998; Martínez-Bustos *et al.*, 2000; Flores-Farias *et al.*, 2000) dentro de las 2, 24 y 48 h de almacenamiento.

Las tortillas presentaron menor firmeza a las 2 h de almacenamiento, para posteriormente incrementar a las 24 h (Campas-Baypoli, 1997) y en la mayoría de los tratamientos se aumenta en menor proporción o se mantiene este valor (1,2,3,6,7,8,9; y 12 respectivamente) a las 48 h de almacenamiento (Fig. 20), lo que nos indica que conforme se incrementa el tiempo de almacenamiento se

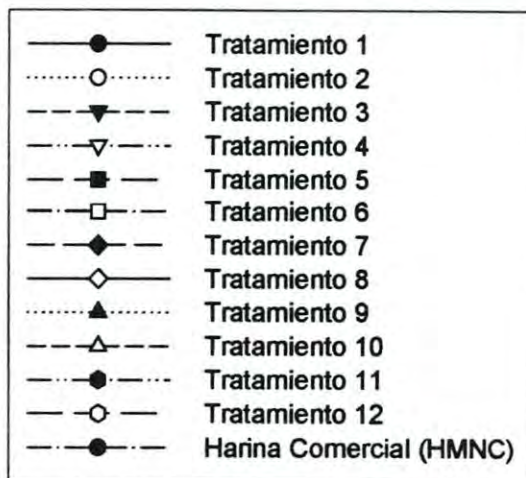
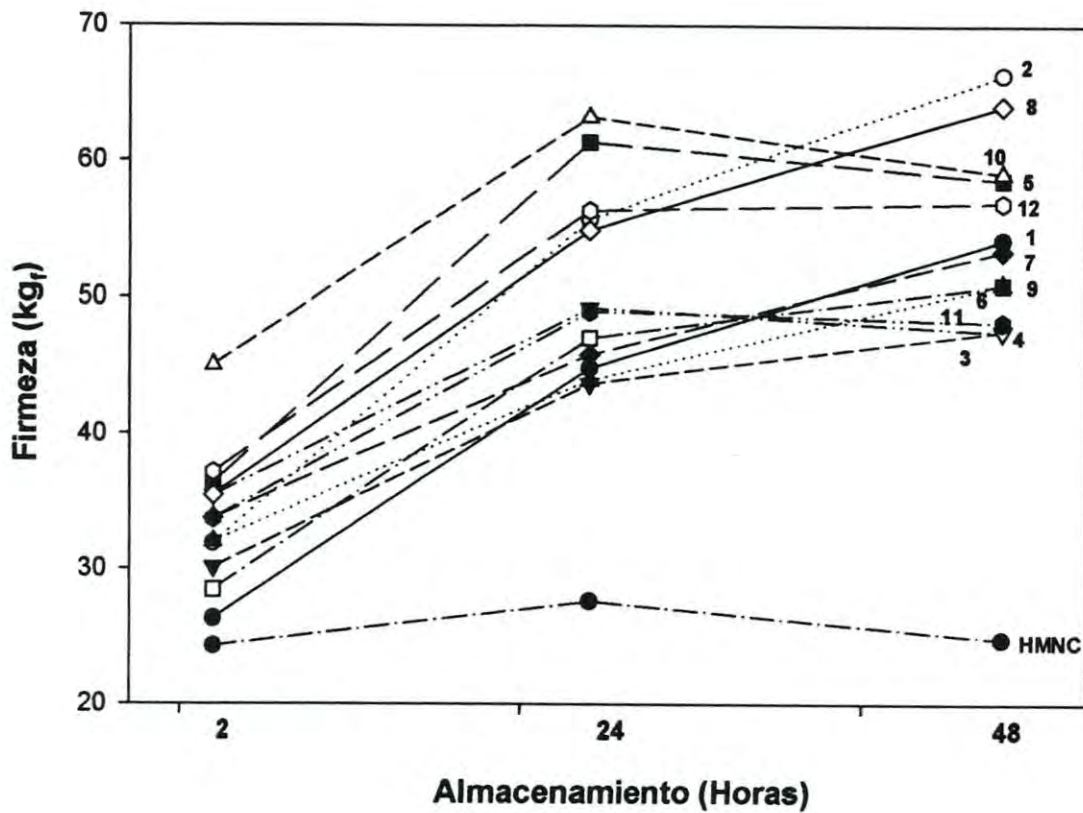


Figura 20. Firmeza en tortilla elaborada con harina de maiz nixtamalizada por extrusión a 2h, 24 h y 48 h de almacenamiento a temperatura ambiente (25 °C).

disminuye la flexibilidad de la tortilla (Suhedro *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 1999). Por lo que después del primer día de almacenamiento, la firmeza fue mayor (aumento la dureza), dando como resultado el decremento de la calidad de la tortilla, esto puede deberse a la retrogradación del almidón y a la pérdida de humedad (Ramírez-Wong y Ortega.,1994; Campas-Baypoli, 1997).

Los tratamientos que a las 48h presentaron un menor valor que el obtenido a las 24 h (4,5,10 y 11) pudo ser debido a la presencia de un reblandecimiento de la tortilla lo que puede iniciar la descomposición del producto así como un ataque de microorganismos, debido a la alta humedad resultado de la condensación que se presenta dentro de la bolsa de polietileno.

El valor mas bajo de firmeza fue la que se presento en tortilla elaborada con HMNC a los diferentes tiempos de almacenamiento. Para las 24 h se incremento en un 2 % su dureza, esto puede ser debido a que se presenta una distribución del tamaño de partícula mas fina, ya que tortillas hechas de harinas con partículas finas presenten cohesividad en la masa y una flexibilidad aceptable (Gómez *et al.*, 1992) así como la incorporación de aditivos que le confieren una mayor retención de agua lo que se traduce en una tortilla mas suave, sin embargo a 48 h de almacenamiento disminuyó a casi el valor presentado a 2 h, esto debido al reblandecimiento originado por la alta cantidad de agua retenida, lo que nos indica que tanto las HMNE así como la HMNC a temperatura ambiente (25 °C) comenzaron a presentar un deterioro a las 48 h de almacenamiento.

Las tortillas elaboradas con HMNE presentan un endurecimiento rápido (mayor firmeza) después de las 24 h de almacenamiento, esto se corrobora con los datos obtenidos en otros estudios (Ramírez-Wong 1989; Gracia y Silva., 1992; Vasquez.,1995; Campas-Baypoli, 1997), lo que puede ser debido a la inhibición de la retención de agua lo que mantiene la suavidad en la tortilla

producto de un grado de gelatinización (Bedolla, 1984; Martínez-Flores *et al.*, 1998).

Correlaciones entre las Diferentes Determinaciones

Con el proposito de conocer si existie alguna relación entre las determinaciones realizadas al extrudido, a la harina nixtamalizada (obtenida por el proceso de extrusion), asi como a la masa y la tortilla elaboradas con esta harina (HMNE), se llevaron acabo correlaciones simples (r), como se muestra en la Tabla 24.

Se observa que la expansión influye en: el color $b+$ (tendencia al amarillo) ($r=0.57$, $a \leq 0.05$), en el Índice de Absorción de Agua e índice de Material Soluble (IAA e IMS) ($r=0.85$, $p \leq 0.01$ y $r=0.50$, $p \leq 0.1$, respectivamente). Esto puede ser debido a que la cantidad de cal adicionada se encuentra relacionada con la expansión y el color del extrudido, por lo que bajas concentraciones de cal originan una mayor expansión y un color mas claro (Faubion *et al.*, 1982).

Ademas altas humedades en la harina durante el proceso de extrusión originan una mayor absorción de agua y pueden funcionar como lubricante (San Martín-Martínez *et al.*, 2003), lo que puede disminuir el daño mecánico en la muestra y a su vez el IMS.

La correlación de lo datos indica que el ITP influye sobre el inflado de la tortilla (INF) ($r = -0.50$, $p \leq 0.05$), esto puede ser debido a que al presentarse un menor tamaño de partícula se incrementa el inflado. Gómez *et al.*, (1987) mencionan que partículas gruesas reducen el inflado en la cocción, lo cual guarda relación con la tendencia de los datos encontrados. Ademas la DAP influye sobre el factor de comprensión tensión en masa (FCT) ($r = 0.66$, $p \leq 0.05$), esto puede ser debido a que a un mayor tamaño de partícula se presenta una alta densidad (Bedolla y Rooney, 1984).

Tabla 24. Correlaciones simples (r) entre los parámetros de Expansión, Índice de Tamaño de Partícula, Índice de Material Soluble, Índice de Absorción de agua, pH, Densidad Aparente, Color L,a,b en harina de maíz nixtamalizada por extrusión; Rollabilidad y Firmeza de la tortilla a 2 h de almacenamiento e Inflado de la tortilla.

Análisis	FCT	HUMA	FIR	INF	ROL	CB	CA	CL	DAP	pH	IAA	IMS	ITP	EXP
Expansión (EXP)	-0.229	-0.026	0.126	-0.074	-0.140	-0.578**	-0.225	-0.140	-0.275	0.153	0.859***	-0.5070*	0.035	1.00
Índice de Tamaño de Partícula (ITP)	-0.380	0.495	0.240	-0.505*	0.225	0.005	0.069	-0.396	0.127	-0.057	0.196	0.100	1.00	
Índice de Material Soluble (IMS)	0.260	-0.0210	-0.604**	-0.095	0.049	0.524*	0.250	-0.152	0.193	-0.354	-0.207	1.00		
Índice de Absorción de Agua	-0.113	0.194	0.129	-0.320	0.006	-0.319	-0.117	-0.054	0.225	0.075	1.00			
pH	-0.040	0.163	0.560*	0.342	-0.366	0.077	0.110	0.245	-0.004	1.00				
Densidad Aparente (DAP)	0.669**	0.029	-0.136	0.430	0.384	0.165	-0.409	0.161	1.00					
Color L (CL)	-0.045	0.448	0.225	0.025	0.099	0.596**	0.136	1.00						
Color a (CA)	-0.322	0.467	-0.129	-0.232	-0.379	0.396	1.00							
Color (b)CB	0.139	0.438	0.048	-0.288	0.192	1.00								
Rollabilidad- 2 h (ROL)	0.025	-0.121	0.290	-0.199	1.00									
Inflado (INF)	-0.014	-0.475	-0.234	1.00										
Firmeza- 2h(FIR)	-0.076	0.179	1.00											
Humedad en masa (HUMA)	0.186	1.00												
Factor compresión (FCT)	1.00													

*=Significativo a un nivel de $p=0.1$ ($p<0.1$).

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

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

La prueba de firmeza en tortilla (a 2 h de almacenamiento) muestra relación con el IMS ($r = -0.60$, $p \leq 0.05$), y pH ($r = 0.56$, $p \leq 0.05$), al analizar la correlación de los datos. Además el IMS presenta relación con Cb ($r = 0.52$, $p \leq 0.1$) (tendencia al amarillo). Esto puede ser debido a que durante el proceso de extrusión al aumentarse la temperatura y la humedad se produce un incremento del IMS lo que se traduciría en una masa más adhesiva y por lo tanto una tortilla con mayor firmeza debido principalmente al proceso de retrogradación después de 24 h de almacenamiento (Arambula *et al.*, 1998; Campas-Baypoli *et al.*, 1999 y 2002).

Condiciones para la Obtención de Harina de Maíz de Calidad Proteica Extrudida

En la Tabla 25 se muestran las diferentes combinaciones de las variables utilizadas en el proceso de extrusión (Humedad de la harina de maíz integral acondicionada H, Temperatura final del extrusor T y Velocidad del tornillo VT en el extrusor) para la producción de harinas de maíz nixtamalizadas por extrusión (HMNE), así como las variables respuesta (Índice de absorción IAA, Luminosidad de color L, y el Factor Compresión Tensión en masa FCT) cuyo modelo de predicción fue significativo a $p \leq 0.05$.

Las variables respuesta significativas al modelo son un indicador de la calidad de las HMNE obtenidas. El IAA nos indica la absorción óptima de la harina para obtener una masa no pegajosa, además es un parámetro de calidad y un indicador del rendimiento de masa fresca y tortilla (Flores-Farias, 1997; Martínez-Bustos *et al.*, 1996). El color referido como blancura (luminosidad, L) y tendencia al amarillo (b+), es un índice de calidad que es más percibido por el consumidor en la tortilla que el color de la harina con que fueron elaboradas (Bedolla y Rooner 1984). El factor compresión tensión es un indicador utilizado en el proceso de producción que hace referencia a la dureza y adhesividad en

Tabla 25. Diseño experimental¹ utilizado para la obtención de diferentes combinaciones de humedad de la harina acondicionada, temperatura y velocidad de tornillo utilizado en el proceso de extrusión, así como los resultados experimentales para las variables respuesta.

Ensayo	Orden	Variables del proceso ²			Variables respuesta ³			
		No	H (X ₁)	T (X ₂)	VT (X ₃)	IAA	CL	Cb
1	5	27 (-1)	120 (-1)	85 (-1)	3.13	61.60	17.43	3.29
2	7	31 (+1)	120 (-1)	85 (-1)	2.59	65.5	17.10	3.27
3	2	27 (-1)	140 (+1)	85 (-1)	3.69	65.23	15.36	3.37
4	11	31 (+1)	140 (+1)	85 (-1)	2.84	68.00	19.23	2.86
5	10	27 (-1)	120 (-1)	115 (+1)	3.39	64.56	15.40	3.47
6	3	31 (+1)	120 (-1)	115 (+1)	2.57	67.93	16.63	2.86
7	6	27 (-1)	140 (+1)	115 (+1)	3.40	63.20	15.30	1.27
8	9	31 (+1)	140 (+1)	115 (+1)	3.32	72.93	17.96	2.28
9	1	29 (0)	130 (0)	100 (0)	3.24	68.76	18.33	2.92
10	4	29 (0)	130 (0)	100 (0)	3.07	65.76	16.56	3.04
11	8	29 (0)	130 (0)	100 (0)	3.19	70.76	18.10	3.23
12	12	29 (0)	130 (0)	100 (0)	3.35	68.66	18.50	3.11

¹ Diseño factorial 2³, 4 puntos centrales, 12 unidades experimentales y 3 variables.

² H= humedad de la muestra acondicionada (%), T= Temperatura del extrusor (°C), VT= Velocidad del Tornillo (rpm); valores entre parentesis hacen referencia a los niveles codificados

³ IAA= Índice de Absorción de Agua (g gel/g ms), CL= Luminosidad del color, Cb (tendencia al color amarillo), FCT= Factor de compresion tension (kg_r).

masas, para producir un alto rendimiento de tortillas con mejores características organolépticas (Ramirez-Wong *et al.*, 1993).

Modelos de Predicción

Índice de Absorción de Agua (IAA). Los valores experimentales de las harinas de Maíz MCP extrudidas variaron de 2.5 a 3.6 g de agua/g de muestra en base seca (Tabla 25). El Análisis de regresión mostró que el IAA fue afectado por la H ($p \leq 0.078$), T ($p \leq 0.0324$). El modelo de predicción para el IAA de las harinas MCP nixtamalizado fue utilizando las variables codificadas:

$$Y_{IAA} = 3.12 - 0.29 * X_1 + 0.20 * X_2 + 0.054 * X_3 + 0.054 * X_1 * X_2 + 0.061 * X_1 * X_3 .$$

Utilizando variables originales:

$$Y_{IAA} = 20.41000 - 0.69667 * H - 0.058313 * T - 0.055625 * VT + 2.68750E-003 * H * T + 2.04167E-003 * H * VT$$

El modelo de predicción utilizado explicó el 85.3 % de la variación total ($p \leq 0.0379$) para los valores de IAA (Tabla 26). El valor de IAA del maíz molido fue de 1.62 (g agua/g m seca), lo que nos indica que a través de los diferentes tratamientos utilizados en el proceso de nixtamalización por extrusión se incremento el IAA de 1 a 2 g de agua/g de muestra seca. En la Figura 21 se muestra el efecto de la humedad de la muestra (H), la temperatura de extrusión (T) y la velocidad del tornillo del extrusor (VT) a 85, 100 y 115 rpm, sobre el IAA de las harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE). Los valores máximos (3.55 g agua/g m seca) y mínimos (2.46 g agua/g m seca) del IAA a 85 rpm se observaron a H = 27 %, T = 140 °C y H = 31 %, T = 120 °C, respectivamente (Fig. 21-1, 21-2). A una velocidad del tornillo de 100 rpm el valor máximo (3.545 g agua/g m seca) y mínimo (2.58 g agua/g m seca) del IAA se observo a H = 27 %, T = 140 °C y H = 31 %, T = 120 °C (Figura 21-3, 21-

Tabla 26. Coeficientes de regresión y análisis de varianza de las ecuaciones de primer orden (modelos de predicción).

Coeficientes	Índice de	Color		Factor de
	Absorción de Agua Y_{IAA}	Luminosidad Y_{CL}	b Y_b	Compresión Tensión Y_{FCT}
Intercepto				
β	3.12	66.12	16.8	2.83
Lineal				
β_1	-0.29***	2.47***	0.93**	-0.016 _{NS}
β_2	0.20**	1.22*	0.16 _{NS}	-0.39**
β_3	0.054 _{NS}	1.04*	-0.48*	-0.36**
Interacciones				
β_{12}	0.054 _{NS}		0.70**	
β_{13}	0.061 _{NS}	0.80 _{NS}		
β_{23}				-0.31*
R²	0.8534	0.7571	0.7855	0.7754
CV	6.00	2.98	4.47	12.15
P_≤	0.0379	0.0469	0.0331	0.0114

*Nivel de Significancia a $p \leq 0.10$

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

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

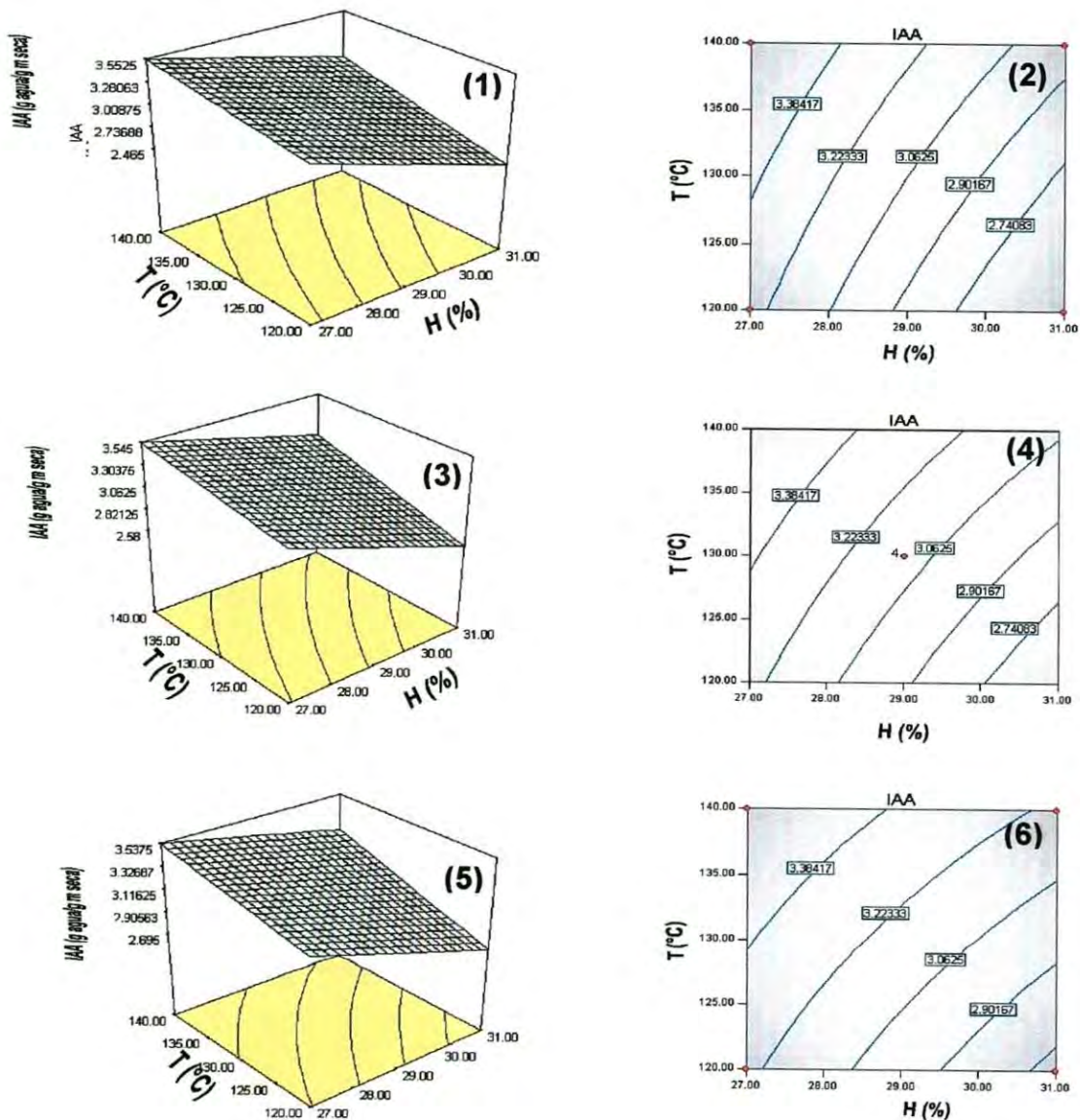


Figura 21. Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la temperatura de extrusión (T) a una velocidad del tornillo (VT) de 85 rpm (1-2), 100 rpm (3-4) y 115 rpm (5-6), sobre el índice de absorción de agua (IAA) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).

4). Para la velocidad máxima del tornillo (115 rpm) el máximo (3.5375) y mínimo (2.695) del IAA se observo a H= 27 %, T=140 °C y H=31 %, T=120 °C (Figura 21-5, 21-6). De manera general se observa que el valor de IAA se vio favorecido conforme se disminuyo la velocidad del tornillo a alta temperatura y baja humedad.

El efecto de la interaccion H-VT y la T a 120, 130 y 140 °C respectivamente sobre el IAA de las HMNE, se muestra en la Figura 22. Los valores maximos (3.26 g agua/g m seca) y minimos (2.46 g agua/g m seca) del IAA a 120 °C se observaron a H = 27 %, VT= 115 rpm y H=31 %, VT= 85 rpm, respectivamente (Fig. 22-1, 22-2). A temperatura media del extrusor (130°C) el maximo (3.41 g agua/g m seca) y minimo (2.71 g agua/g m seca) del IAA se observo a H= 27 %, VT= 115 rpm y H=31 %, T= 85 rpm, respectivamante (Fig. 22-3, 22-4). Para T de 140 °C, el maximo (3.55 g agua/g m seca) y minimo (2.96 g agua/g m seca) se observo a H= 27 %, VT= 115 rpm y H=31 %, T= 85 rpm, respectivamante (Fig. 22-5, 22-6). De manera general se observa que el valor de IAA se vio favorecido conforme se incremento la temperatura a un valor de humedad baja y velocidad del tornillo alta. Vargas-López *et al.* (1991) menciona que grits extrudidos de maíz-sorgo y almidón de maíz exhiben un máximo IAA a altas temperaturas del cañón y altos contenidos de humedad.

Las harinas extrudidas presentan valores que se asemejan a los obtenidos por Campas-Baypoli *et al.* (1997) para masas utilizando el método del IAA a temperatura ambiente, y otros estudios en donde se reportan valores de IAA (a 38 °C, metodología sin corrección) de 4.2 y 4.4 g gel/g m seca para harinas de maíz nixtamalizadas comerciales elaboradas en los Estados Unidos y en México (Bedolla y Rooney 1984), 2.9 a 3.8 g gel/ g m seca en la comparación de cinco HMNC (Gómez el at.,1987) y 2.45 a 3.00 g gel/ g m seca para HMNE (Reyes Moreno *et al.*, 2003).

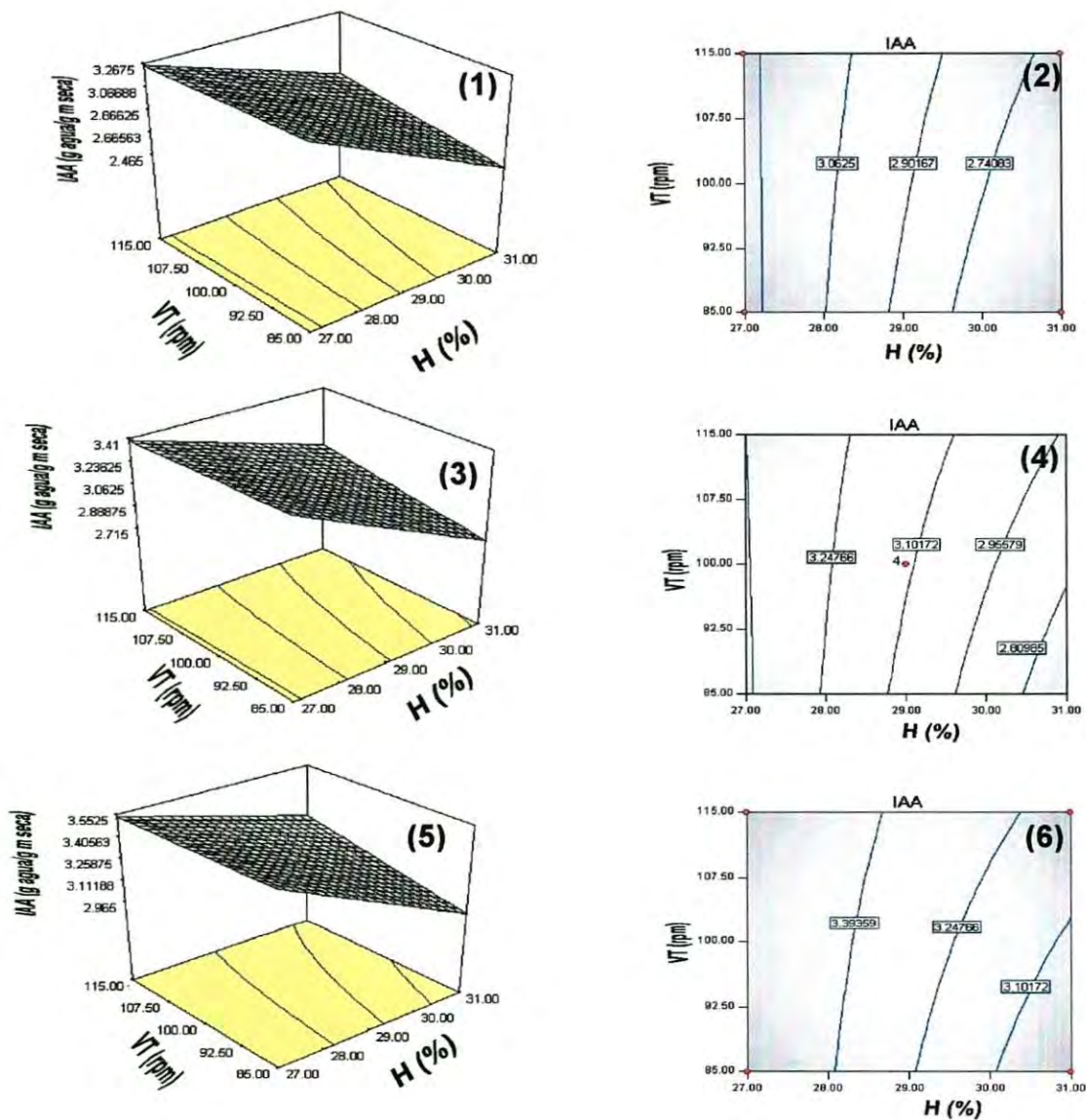


Figura 22. Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la velocidad del tornillo del extrusor (VT) a una temperatura (T) de 120 °C (1-2), 130 °C (3-4) y 140 °C (5-6) sobre el índice de absorción de agua (IAA) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).

El IAA a temperatura ambiente, está relacionado directamente con la absorción óptima de agua de una harina para tener una masa con una adecuada cohesividad (no pegajosa) (Flores-Farias, 1997). Campas-Baypoli *et al.* (1999) reporta el IAA de maíz obtenido a temperatura ambiente (1.60 g agua/g de muestra seca) que presenta mucha similitud al IAA del maíz molido (1.62 g agua/g de muestra 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 harina utilizada, siendo este un parámetro de calidad y un indicador del rendimiento de masa fresca que depende de la disponibilidad de los grupos hidrofílicos y la capacidad de formar geles de las macromoléculas (Molina *et al.*, 1977; Martínez-Bustos *et al.* 1996), para obtener en la elaboración de masas una mejor cohesividad.

También está relacionado con la capacidad para la producción de tortillas con una aceptable flexibilidad y recalentamiento por el vapor generado durante su horneado (Almeida-Domínguez *et al.*, 1996). Vargas-López *et al.* (1991) menciona que tortillas con corta vida de anaquel resultan de altos IAA. Cuanto mayor sea el índice de absorción de agua, el rendimiento de tortillas será mayor dependiendo de la textura de la masa, la temperatura de cocimiento de las tortillas, el diámetro y espesor de las mismas (Flores-Farias, 1997).

Bello-Pérez *et al.* (2000) reportaron que uno de los factores críticos en la producción de la harina de maíz nixtamalizada con apropiado IAA es el proceso de secado, ya que un periodo largo se provoca el rompimiento de cadenas de almidón generando cadenas cortas las cuales retienen una gran cantidad de moléculas de agua. Otro factor crítico se da durante el calentamiento, ya que al ser excesivo se generan pérdidas en la integridad y estructura del granulo de almidón, formando una pasta gelatinizada con altos IAA, lo que puede originar masas blandas que son difíciles de manipular durante la elaboración de tortillas (Campas-Baypoli *et al.*, 1999).

Color.

Luminosidad (CL). La luminosidad del color L de las harinas de MCP nixtamalizadas por extrusión variaron de 61.6 a 72.93 (Tabla 25). El Análisis de regresión mostró que el CL fue afectado por la H ($p \leq 0.0128$), T ($p \leq 0.1383$), VT ($p \leq 0.1925$). El modelo de predicción para el CL de las harinas MCP nixtamalizado fue utilizando las variables codificadas:

$$Y_{CL} = 66.12 + 2.47 * X_1 + 1.22 * X_2 + 1.04 * X_3 + 0.80 * X_1 * X_3$$

Utilizando variables originales:

$$Y_{CL} = 85.19687 - 1.44354 * H + 0.12212 * T - 0.70787 * VT + 0.026792 * H * VT$$

El modelo de predicción utilizado explicó el 75.71 % de la variación total ($p \leq 0.0469$) para los valores de CL (Tabla 26). El valor de CL del maíz molido fue de 73.53, esto indica los tratamientos utilizados en el proceso de nixtamalización por extrusión sufrieron una tendencia al obscurecimiento de 1 hasta 11 unidades (0.81 a 16 %). Bedolla y Rooney (1984) menciona que la HMNC presenta un decremento en blancura del 16 al 22 % en la elaboración de la tortilla. Pons-Hernandez (2004) menciona que el MCP V-537 C presenta un valor (luminosidad) alrededor de 60. En la Figura 23 se observa el efecto de la humedad en la muestra acondicionada, la velocidad del tornillo en el extrusor y la temperatura de extrusión a 120, 130 y 140 °C sobre el sobre la luminosidad del color (CL) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).

Los valores máximos (69.20) y mínimos (62.19) del CL a una temperatura de 120 °C se observaron a H = 31 %, VT = 115 rpm y H = 27 %, VT = 85 rpm, (Fig. 23-1, 23-2). A 130 °C el valor máximo (70.45) y mínimo (63.41)

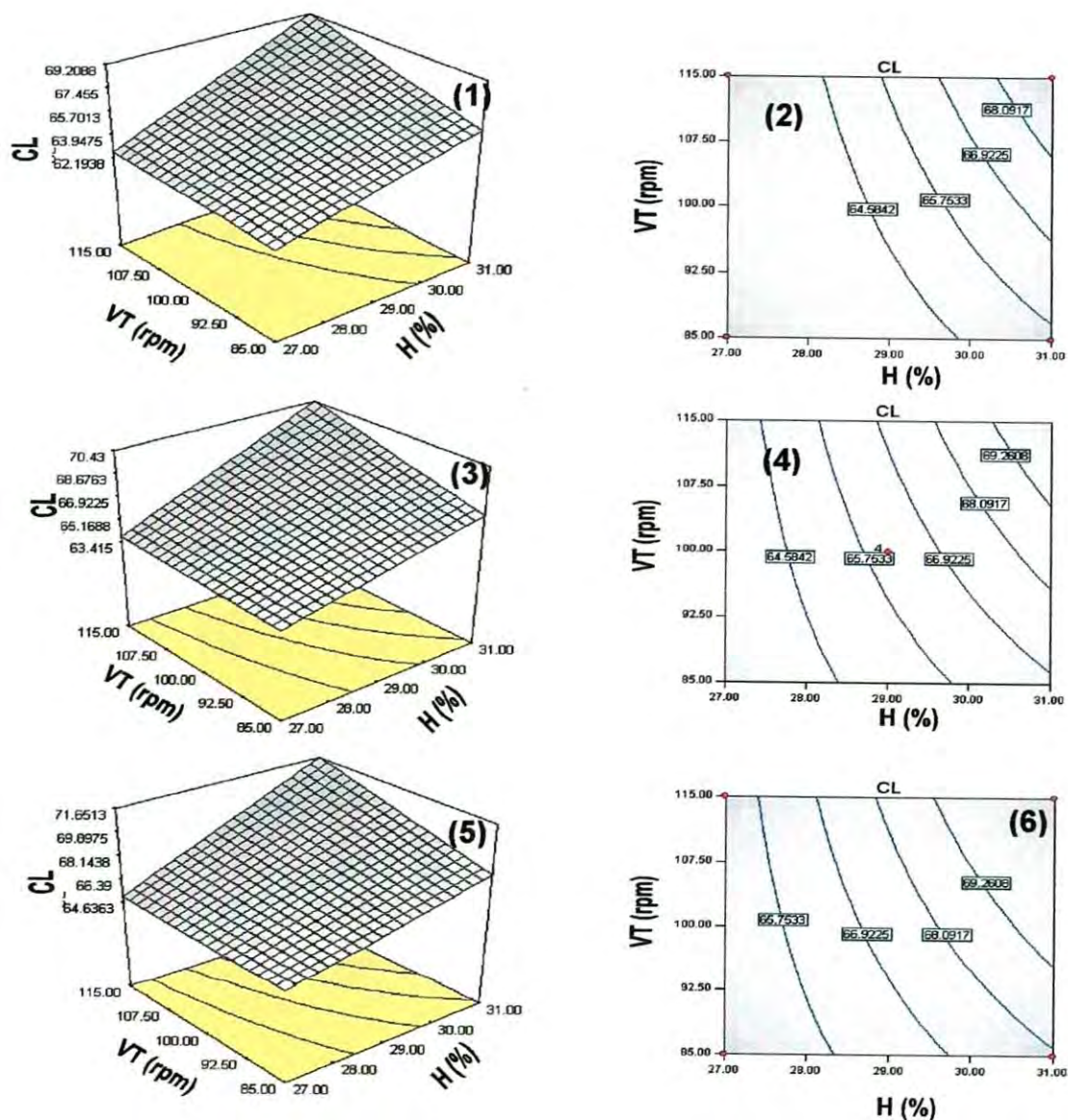


Figura 23. Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la velocidad del tornillo del extrusor (VT) a una temperatura (T) de 120 °C (1-2), 130 °C (3-4) y 140 °C (5-6), sobre la luminosidad del color (CL) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).

del CL se observó a H= 31 %, VT= 115 rpm y H= 27 %,VT= 85 rpm (Fig. 23-3, 23-4). A una temperatura del extrusor de 140 °C, el máximo (71.65) y mínimo (64.63) del CL se observó a H= 31 %, VT= 115 rpm y H=27 %, VT= 85 rpm (Fig. 23-5, 23-6). De manera general se observa que el valor del CL se vio favorecido conforme se incrementó la temperatura a alta humedad y alta velocidad del tornillo.

(Cb). La tendencia al color amarillo (b+) de las harinas de MCP nixtamalizadas por extrusión variaron de 15.30 a 19.23 (Tabla 25). El Análisis de regresión mostró que el Cb fue afectado por la H ($p \leq 0.0140$), VT ($p \leq 0.1276$), H-T ($p \leq 0.0408$). El modelo de predicción para el Cb de las harinas MCP nixtamalizado fue utilizando las variables codificadas:

$$Y_{cb} = 16.80 + 0.93 * X_1 + 0.16 * X_2 - 0.48 * X_3 + 0.70 * X_1 * X_3$$

Utilizando variables originales

$$Y_{cb} = 137.08667 - 4.11000 * H - 1.00431 * T - 0.031917 * VT + 0.035188 * H * T$$

El modelo de predicción utilizado explicó el 78.55 % de la variación total ($p \leq 0.0331$) para los valores de Cb (Tabla 26). El valor de Cb del maíz molido fue de 11.17, esto indica los tratamientos utilizados en el proceso de nixtamalización por extrusión sufrieron una tendencia al oscurecimiento de 4.13 hasta 8.06 unidades. Bedolla y Rooney (1984) reporta un incremento del color amarillo del 3 al 26 % en harina comercial cuando es procesada a tortilla.

En la Figura 24 se muestra el efecto de la humedad de la muestra acondicionada, la temperatura del extrusor y la velocidad del tornillo en el proceso de extrusión a 85, 100 y 115 rpm sobre el color amarillo (Cb +) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE). Los valores

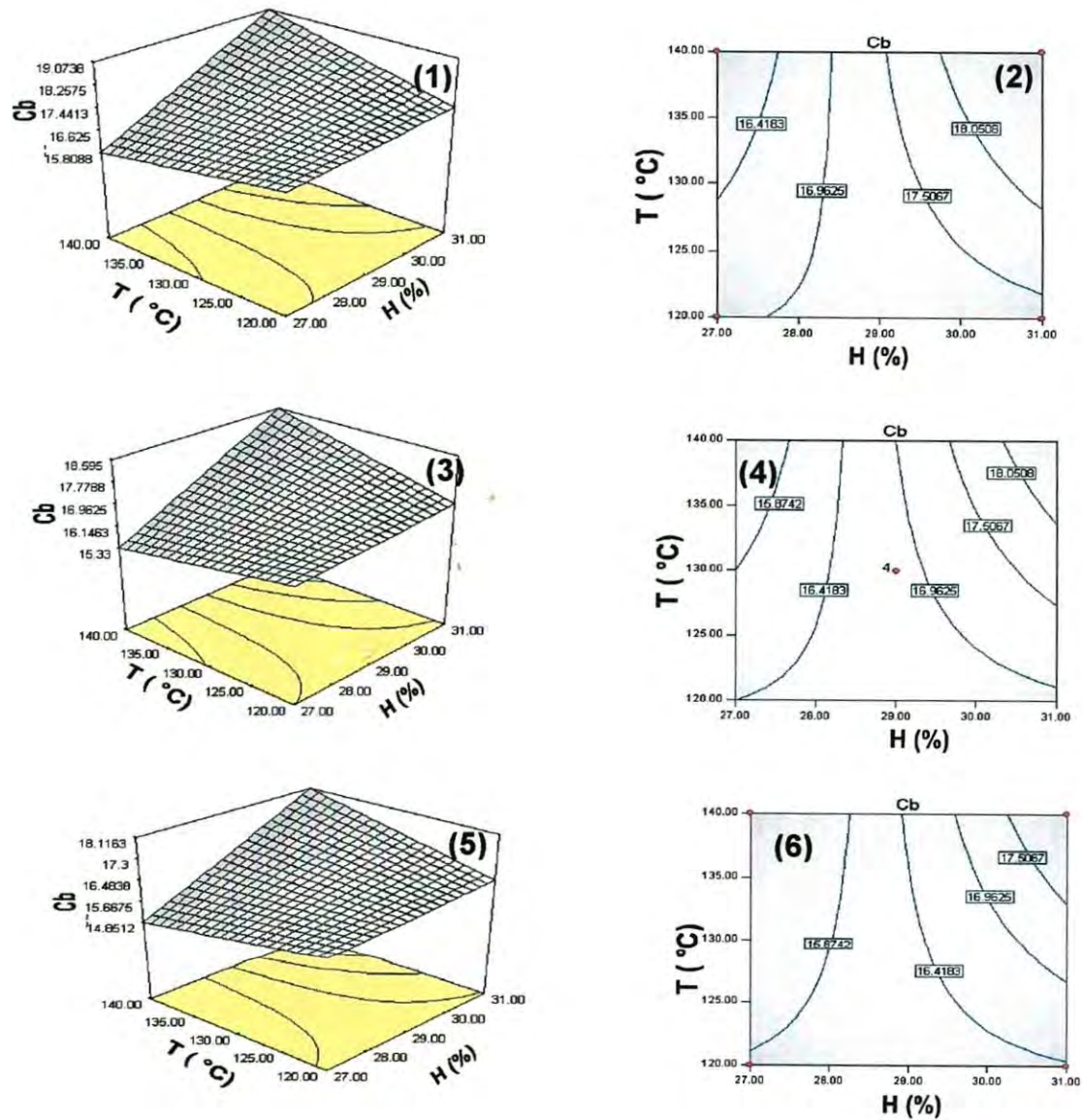


Figura 24. Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la humedad en la harina acondicionada (H) y la temperatura del extrusor (T) a una velocidad del tornillo en el proceso de extrusión (VT) de 85 rpm (1-2), 100 rpm (3-4) y 115 rpm (5-6), sobre el color b + (Cb) de harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).

máximos (19.07) y mínimos (15.80) del Cb a una velocidad del tornillo de 85 rpm se observaron a H = 31 %, T= 140 °C y H=27 %, T= 140 °C, (Figura 24-1, 24-2). A 100 rpm el valor máximo (18.59) y mínimo (15.33) del Cb se observó a H= 31 %, T= 140 y H= 27 %, T= 140 °C (Figura 24-3, 24-4). Para una velocidad del extrusor de 115 rpm, el máximo (18.11) y mínimo (14.85) del Cb+ se observó a H= 31 %, T= 140 °C y H=27 %, T= 140 °C (Fig. 23-5, 23-6). Se observa de manera general el valor del Cb se vio favorecido conforme se incrementó la humedad y temperatura a una baja velocidad del tornillo.

Bedolla y Rooney (1984) reportaron que las harinas de maíz nixtamalizadas elaboradas en los Estados Unidos (E.U.) fueron más blancas (L= 83.7) y menos amarillas (b=13.1) que las elaboradas en México (L=79.7, b=15.8) respectivamente. Por lo que al compararla con los resultados obtenidos en el presente estudio observamos que presenta mayor similitud a las HMNC elaboradas en México. Las elaboradas en los E.U.A presentaron menor variación en color que las elaboradas en México, ya que la materia prima es más homogénea en los E.U que en México, debido a las políticas de abasto.

Bazua *et al.* (1979) menciona que la concentración de cal afecta el color de las harinas de maíz obtenidas por los procesos de extrusión y nixtamalización. Martínez-Bustos *et al.* (1998) reportan valores de color (L y b+) a diferentes condiciones de extrusión: concentración de cal (0.15-0.35 %), temperatura (130 °C) y humedad (16-20 %), en donde se disminuye el valor de CL (75-66) y se incrementa el valor de Cb (6-10) al aumentar la concentración de cal y la humedad, esto corrobora las tendencias reportadas en los datos obtenidos de las HMNE.

El color en tortilla es un índice de calidad que es más percibido que el color de la harina con que fueron elaboradas (Bedolla y Rooner 1984). Salinas-Moreno (2004) reporta que la proporción de amilopectina:amilosa en la masa de maíz afecta el color de la tortilla, así como sus características de textura, lo que

indica que al incrementarse la proporción de amilosa el color se oscurece y se incrementa la capacidad de deformación.

Factor de Compresión Tensión (FCT). Las masas de harinas de Maíz MCP extrudidas presentaron valores experimentales de que variaron de 1.27 a 3.47. (Tabla 25). El Análisis de regresión mostró que el FCT fue afectado por la T ($p \leq 0.0172$), VT ($p \leq 0.0228$) y la interacción T-VT ($p \leq 0.0443$). El modelo de predicción para el FCT de las masas elaboradas con harinas MCP nixtamalizado fue utilizando las variables codificadas:

$$Y_{FCT} = 2.83 - 0.39 * X_2 - 0.36 * X_3 - 0.31 * X_2 * X_3$$

Utilizando variables originales:

$$Y_{FCT} = -16.22917 + 0.16529 * T + 0.24117 * VT - 2.04167E-003 * T * VT$$

El modelo de predicción utilizado explicó el 77.54 % de la variación total ($p \leq 0.0114$) para los valores del FCT (Tabla 26).

En la Figura 25 se muestra el efecto de la temperatura, la velocidad del tornillo y la Humedad de la muestra acondicionada a 27, 29 y 31% respectivamente, sobre el factor de compresión tensión (FCT) de masas elaboradas con HMNE. A una humedad de la harina acondicionada de 27 %, los valores máximos (3.29) y mínimos (1.97) se observaron a T = 120 °C, VT= 85 rpm y T=140 °C, VT= 115 rpm, (Fig. 25-1, 25-2). A humedades de 29 y 31% se presentaron valores maximos (3.28, 3.26; respectivamente) y minimos (1.77, 1.75; respectivamente) con tendencias muy similares a las condiciones de menor humedad de la muestra acondicionada (27 %) (Fig. 25-3, 25-4, 25-5, 25-6). De manera general se observa que a valores bajos de VT al rango de T utilizada se presentan valores de FCT arriba de 3 unidades, sin embargo al incrementarse la VT la relación FCT disminuye en 1.5 unidades.

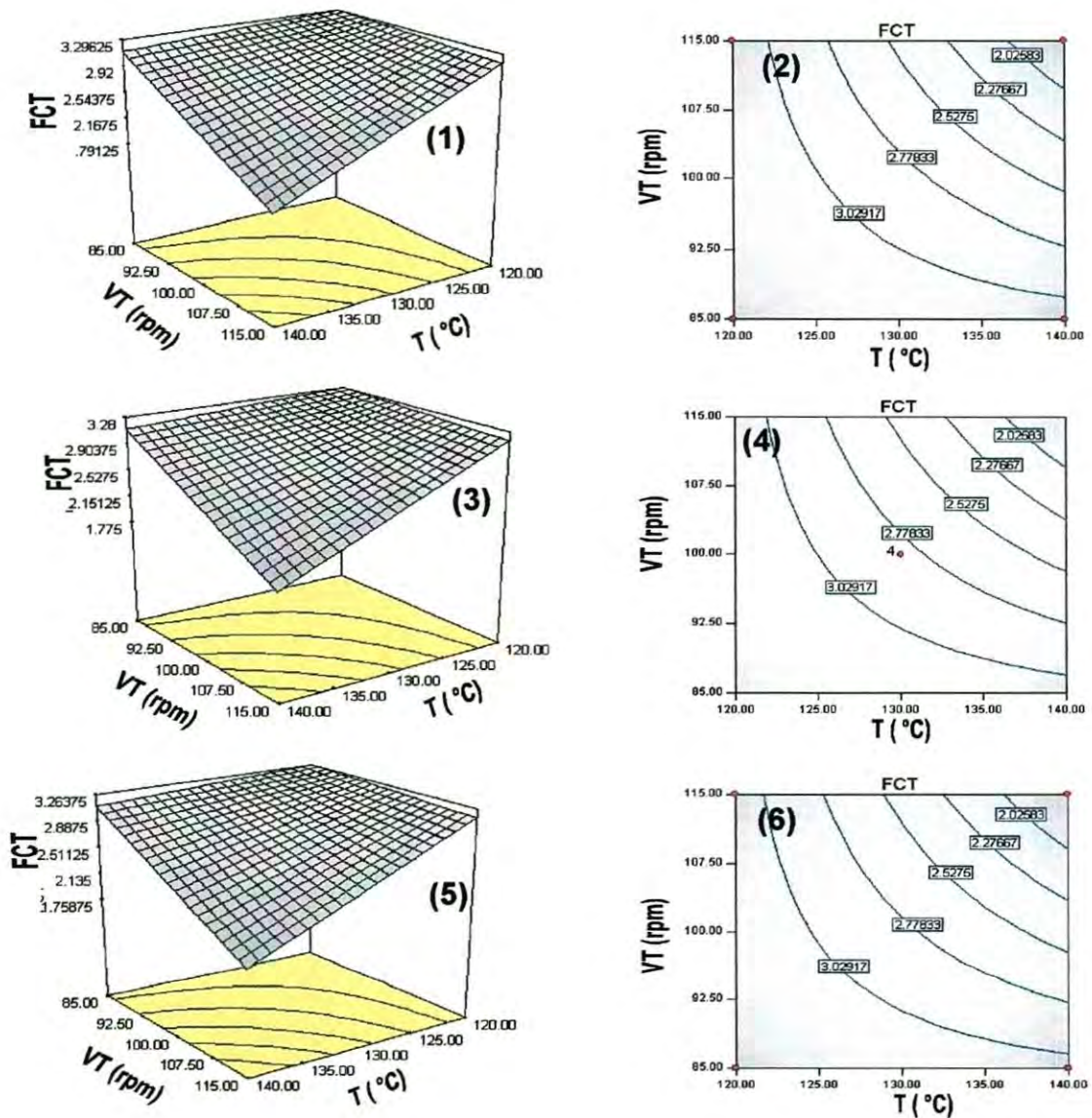


Figura 25. Gráficos de superficie de respuesta y de contorno para el efecto de la velocidad del tornillo (VT) y la temperatura del extrusor (T) a una humedad de la muestra acondicionada (H) de 27 % (1-2), 29 % (3-4) y 31 % (5-6), sobre el Factor de Compresión Tension (FCT) de las masa elaboradas con harinas de maíz (MCP) nixtamalizadas por extrusión (HMNE).

Ramirez-Wong *et al.* (1993), reporta valores de FCT para masas preparadas a un tiempo de cocción de 55 min a tres diferentes contenidos de humedad. Los mejores valores se reportaron a un rango de FCT de 2.34 a 2.93 a una humedad de la masa de 56 ± 0.5 %, esto indica que a estos valores se presenta un grado apropiado de dureza y adhesividad en masa lo que se traduce en una textura optima para la elaboración de tortilla. Las condiciones de mayor H y T (31 % y 140 °C, respectivamente) se obtuvieron valores mas cercanos a los que se reporta en literatura, por lo que se puede suponer que en estos tratamientos se dio una mayor gelatinizacion, asi como a baja humedad (27 %) y alta T y VT (140 °C , 115 rpm) se presenta mas efecto mecánico y térmico en el almidón, lo que hace que la absorción y el FCT sean bajos.

Con las HMNE obtenidas se elaboraron masas que alcanzaron humedades en un rango de 47.01 a 53.72 % y un factor de compresión cercano a 3, osea que se necesita alrededor de 3 veces mas fuerza para comprimir la masa (fuerza de compresión) y solo la tercera parte de esta para separarla (fuerza de tensión), lo que nos indica que de manera general la masa presento poca adhesividad. Como se observa en la Figura 25 las proporciones utilizadas en humedad de la harina acondicionada no influye en el comportamiento del FCT de la HMNE, sin embargo el contenido de humedad en masa incrementa la adhesividad y disminuye la dureza y el FCT (Ramírez-Wong *et al.*, 1993).

Optimización del proceso de Extrusión

Las Figuras 21 (2,4,6); 22 (2,4,6); 23 (2,4,6); 24 (2,4,6) y 25 (2,4,6) muestran el efecto de las variables del proceso de extrusión (H,T, VT) sobre IAA, CL, Cb y FCT de HMNE. Al sobreponer estos gráficos de contorno se permitió la construcción de la Figura 26 que fue utilizada para la selección de la mejor combinación de las variables del proceso de extrusión para la producción

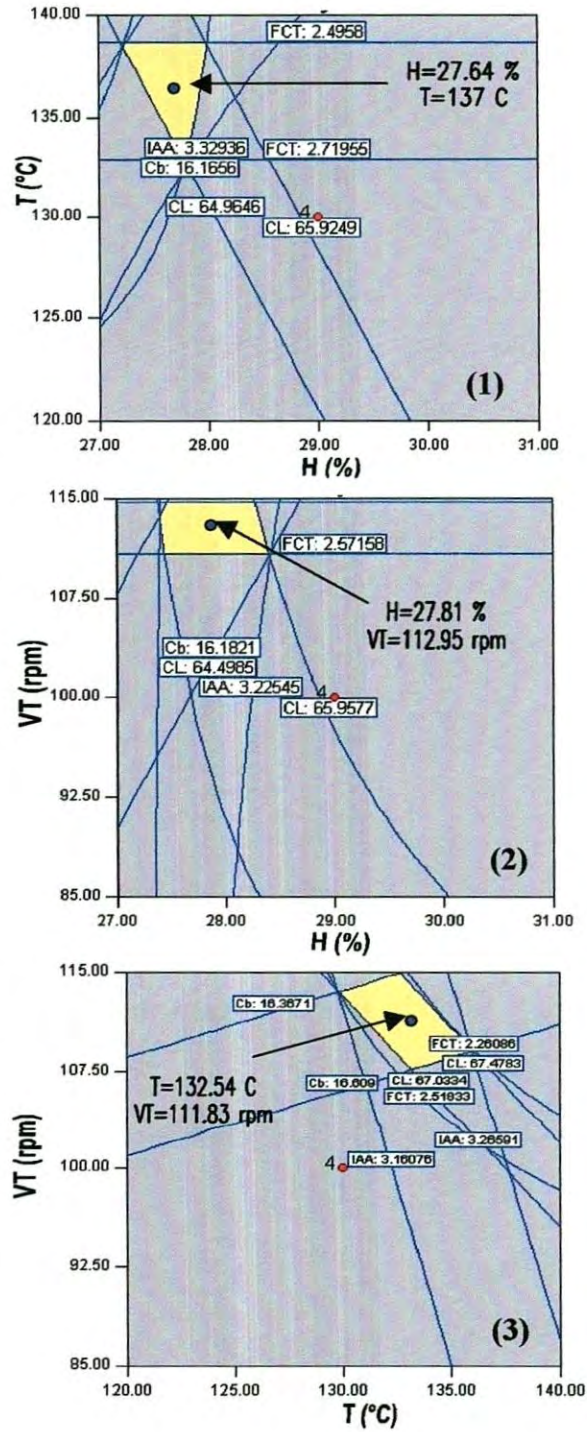


Figura 26. Regiones de mejores combinaciones de humedad de la muestra acondicionada (H), temperatura (T) y velocidad del tornillo (VT) en el proceso de extrusión.

de HMNE. En la región de optimización se escogió el punto central para cada gráfico 25-1, 25-2, 25-3 que corresponden: $H = 27.64\%$ / $T = 137.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 27.81\%$ / $VT = 112.95\text{ rpm}$ y $T = 132.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $VT = 111.83\text{ rpm}$ respectivamente. La combinación óptima de las condiciones de operación del extrusor de tornillo simple fueron derivadas del promedio de los valores centrales (Fig. 26), obteniendo: $H = 27.72\%$, $T = 134.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $VT = 112.39\text{ rpm}$.

CONCLUSIONES

Con todos los tratamientos obtenidos a través del proceso de nixtamalización por extrusión se obtuvieron harinas de maíz nixtamalizadas así como masa y tortillas.

La variedad de maíz de calidad proteica (MCP) utilizada (V 537C) presenta buenas características para ser utilizada en el proceso de elaboración de harinas de maíz nixtamalizadas.

La humedad de la harina de maíz nixtamalizada por extrusión (HMNE) esta relacionada con el índice de absorción de agua (IAA), ya que harinas que reportaron un mayor contenido de humedad presentaron un menor IAA .

Tanto la harina comercial, como las nixtamalizadas por extrusión 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 numero 60 (250 μ m). Las diferencias encontradas en la DTP así como en el ITP, pueden deberse a operaciones en el proceso, principalmente a la molienda.

Los tratamientos 5 (H=27%, T=120 °C, VT=115 rpm) y 6 (H=31%, T=120 °C, VT=115 rpm) presentaron una intensidad cercana a la obtenida en la HMI, lo que nos indica que en estos tratamientos se presento un daño menor en el almidón, de manera opuesta el tratamiento 8 (H=31%, T=140 °C, VT=115 rpm) en donde se tiene la menor intensidad, ya que al incrementarse la humedad en la muestra y ser expuestas a altas temperaturas, se presenta una gelatinización parcial mayor.

El tratamiento 7 (H=27%, T=140°C, VT=115 rpm) muestra un comportamiento similar al que se presenta en la HMNC, esto puede deberse a

que al tener un menor porcentaje de humedad, las otras variables (temperatura y la velocidad del tornillo) presentaron un mayor efecto térmico y mecánico en el almidón de la HMNE, lo que incremento su intensidad en la difracción de Rayos X.

A partir de las 24 h de almacenamiento de la tortilla elaborada con HMNE se observó una disminución de la rollabilidad y la firmeza, lo que nos indica que conforme se incrementa el tiempo de almacenamiento se disminuyo la flexibilidad y se incremento la dureza en la tortilla almacenada.

Las variables respuesta significativas al modelo: Índice de Absorción de Agua, Color L, a+ (luminosidad y tendencia al amarillo) y Factor de Compresión Tensión son indicadores de la calidad de las HMNE obtenidas.

En el efecto de VT sobre la interacción H-T el valor de IAA se vio favorecido conforme se disminuyó la velocidad del tornillo a alta temperatura (140 °C) y baja humedad (27%). Para el efecto de T sobre la interacción H-VT el IAA se vio favorecido conforme se incremento la temperatura a un valor de humedad baja (27%) y velocidad del tornillo alta (115 rpm).

El valor del CL sobre la interacción H-VT se vió favorecido conforme se incremento la temperatura a alta humedad (31%) y alta velocidad del tornillo (115 rpm). El valor del Cb sobre la interacción H-T se vio favorecido conforme se incremento la humedad (27 %) y la temperatura (140 °C) a una alta velocidad del tornillo.

El valor del FCT sobre la interacción T-VT se vio favorecido conforme disminuyo la temperatura (120 °C) y la velocidad del tornillo (85 rpm) a distintas humedades. A valores bajos de VT al rango de T utilizada se presentan valores de FCT arriba de 3 unidades, sin embargo, al incrementarse la VT la relación FCT disminuye en 1.5 unidades

La combinación óptima de las condiciones de operación del extrusor de tornillo simple fueron derivadas del promedio de los valores centrales, obteniendo: $H = 27.72 \%$, $T = 134.84 \text{ }^\circ\text{C}$ y $VT = 112.39 \text{ rpm}$.

El proceso de extrusión muestra ser una alternativa para la producción de harina de maíz nixtamalizada con la que se pueden elaborar masas y tortillas con buenas características texturales, en donde no se presentan efluentes contaminantes, por lo que este proceso tiene un gran potencial para ser utilizado a nivel industrial.

SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES

Estudiar los cambios fisicoquímicos que sufre el almidón en el proceso de nixtamalización por extrusión en las mejores condiciones del proceso del producto extrudido, harina, masa y tortilla.

Cuantificar el efecto de la nixtamalización por extrusión sobre las características de calidad proteica (contenido de lisina y triptófano) en la HMNE obtenida.

Determinar el efecto de la adición de aditivos en la Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión obtenida.

Elaborar y evaluar otros productos (botanas expandidas, frituras, atoles) con la Harina de Maíz Nixtamalizada por Extrusión obtenida.

BIBLIOGRAFÍA

- AACC. 1976. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. Ed. The Association, St. Paul, Minn.
- AACC. 1995. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. Ed. The Association, St. Paul, Minn.
- AACC. 2001. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*. Ed. The Association, St. Paul, Minn.
- Almeida, Dominguez H.D., y Rooney, I.W. 1996. Avances en la manufactura y calidad de productos de maíz nixtamalizado. *Industria Alimentaria* 18(6):4-13.
- Anderson, R.A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., Griffin E. L. Jr. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci Today* 14 (11) 1-12.
- Anonymus. 1985. *Webster's Ninth New Collegiate Dictionary*. Merriam-Webster, Inc., Springfield, Massachusetts.
- Arambula-Villa, G., Figueroa, J.D.C., Martinez 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 Science*. 63(2): 338-341.
- Arambula-Villa, G., Yañez-Limon J.M., Voroblev-Vasiliebich Y., González-Hernández J. 2000. Coeficiente efectivo de difusión de agua en masa de maíz nixtamalizado por extrusión. *Agrociencia* 34(6):717-727.
- Areas, J.A.G. 1992. Extrusion of foods proteins. *Cr Rev Food Sci Nutr* 32(4) :365-392.
- Asp, N.G., y Bjorck I. 1989. Nutritional properties of extruded foods, *En extrusion Cooking*, p 399-434, ed Mercier, C. Linko, P. Harper J.M. American association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, MN. USA.
- Banks, N., and Greenwood, C. T. 1975. *Stach and its components*. Halsted Press, Willy and Sons. New York. In Robles de T. R. R. 1986.
- Bazua, C.D., Guera, R., and Sterner, H. 1979. Extruded corn flour as an alternative to lime heated corn flour for tortilla preparation. *J Food Sci*, 44: 940-941.
- Bedolla, S., and Rooney L., W. 1982. Cooking maize for masa production, in *Cereal foods World*. Vol 27 (5).

46
SEI - SHEI

- Bedolla, Villapudua S. 1983. Development and characterization of an instant tortilla flour from sorghum and maize infra-red cooking (micronizing) and extrusion cooking. Dissertation submitted to the graduate college of Texas A & M University. Doctor of Philosophy.
- Bedolla, Villapudua S. 1984. Desarrollo y Caracterización de Harinas Instantáneas utilizando Sorgo y maíz por los métodos de cocimiento por extrusión y micronización. En Primera reunion Panamericana de extrusión de alimentos CIATECH, Chihuahua México.
- Bedolla, Villapudua S., and Rooney L.W. 1984. Characteristics of U.S and Mexican Instant Maize Flours for Tortilla and Snack Preparation. *Cereal Foods World* 29(11):732-735.
- Bello-Pérez, L.A., Osorio-Díaz P., Agama-Acevedo E., Nuñez-Santiago C., Paredes-López O., 2000, "Chemical, Physicochemical and Rheological Properties of masas and Nixtamalized Corn Flour", *Agrociencia* 36:319-328.
- 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.
- Bender, Filmore E. 1976. Systems analysis for the food industry, by F.E.B and Amihud Kramer, Gerald Kramer. AVI. Westport, Connecticut, USA.
- Bennet, E.H. 1950. Kernel hardness in corn II a microscopic examination of hard and soft types of dent corn. *Cereal Chem.* 27:232-238.
- Boyer, C.D., y Shanon, J.C. 1987. Carbohydrates of the kernel. En S.A. Watson y P.E. Ramstad, eds. *Corn:chemistry and technology*, p 253-272. St Paul, Minn., EEUU., Am. Assoc. Cereal Chem.
- Bjorck, Y., and Asp, N.G. 1983. The effects of extrusion-cooking on nutritional value. A literature review. *J Food Engrn* 2:281-308.
- Bressani, R., Breuner, M. y Ortiz, M.A. 1989. Contenido de fibra ácido- y neutrodetergente y de minerales menores en maíz y su tortilla. *Arch. Latinoam. Nutr.*, 39: 382-391
- Bressani, R. 1990. Chemistry, technology and nutritional value of maize tortillas. *Food Rev Int* 6(2): 225-264.
- Bressani, R. 1994. Opaque 2 corn in human nutrition and utilization. In: Quality protein maize: 1964-1994. Proc. Of the international symposium on quality protein maize. Embrapa/ CNPMS, Sete Lagoas MG Brasil. December 1-3 1994. p 41-63.

- Bressani, R., Rooney, L. W. Y Serna-Saldivar, S.O. 1997. Fortification of corn masa flour with iron and/or other nutrients. SASTAIN. US. Agency for International Development. Washington, DC. Pp 166.
- Briones-Encinia F., y Martínez Garza A. 2002. Eficiencia de algunos Diseños Experimentales en la Estimación de una Superficie de Respuesta. *Agrociencia* 36 (2): 201-210.
- Buendía, G.O. 1981. Características Morfológicas de mazorca, propiedades físicas y de calidad proteica del maíz (*Zea mays* L), normal y mejorado, relacionado con el proceso de nixtamalización. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo.
- Camire A. L., and Clydesdale, F. M. 1981. Effect of pH and heat treatment on the binding of calcium, magnesium, zinc, and iron to wheat bran and fractions dietary fiber. *J. Food Sci.* 46:548-551.
- Campas-Baypoli, O. 1997. Cambios Físico-Químicos en el Almidón durante el Proceso de Elaboración y Almacenamiento de la Tortilla de Maíz. Tesis de Maestría. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. U Sonora.
- Campas-Baypoli, O., Rosas-Burgos, E., Torres-Chavez, I., Ramirez-Wong, B., and Serna-Saldivar, O. 1999. Physicochemical Changes of Starch during Maize Tortilla Production. *Starch/Stärke* 51:173-177.
- Campas-Baypoli, O., Rosas-Burgos, E., Torres-Chavez, I., Ramirez-Wong, B., Serna-Saldivar, O. 2002. Physicochemical Changes of Starch in Maize Tortillas During Storage at Room and Refrigeration Temperatures. *Starch/Stärke* 54:358-363.
- Celorio, M.F. 1972. Método y aparato para obtener harina nixtamalizada por proceso seco. Patente México 125,285.
- Charbonniere, R., Duprat, F., and Giubot, A. 1973. Changes in various starches by cooking-extrusion processing. II. Physical structure of extruded products. *Cereal Sci. Today*, 18 (9).
- Chen, J., Serafín, F.F., Pandada, R.N. y Doun, H. 1991. Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *J. Food Sci* 56: 84-89.
- Christianson, D.D. 1963. Alcohol-soluble proteins of cereal grains. *Fed. Proc.* 25.
- Christianson, D.D., Wall, J.S., Dimler, R.J. y Booth, A.N. 1968. Nutritionally available niacin in corn. Isolation and biological activity. *J. Agric. Food Chem.*, 16: 100-104.

- Clavijero, F.J. 1979. A History of Mexico. Vol I. Translation of *Storia Antica de Messico* (1787). Garland publishing, Inc., New York, pp 476.
- Cochran, W.G Y G.M Cox. 1957. *Experimental Designs*. 2^a ed. Wiley, Nueva York.
- Colonna, P., Tayeb, Mercier C. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products. In: Mercier C, Linko P, Harper M, editors. *Extrusion cooking* St Paul Minn: AACC. P 247-319.
- Darby, R. 1976. *Viscoelastic fluids: An introduction to their properties and behavior*. Chemical Processing and Engineering. Marcel Dekker Inc., New York, NY, p 51-394.
- Design Expert 2002. version 6.0.7 (trial versión) by STAT-EASE. Inc. MN. USA.
- Diez de Sollano, S.F. and Berriozabal, J.M. 1955. Method of producing corn tortilla flour. Patent U.S.A. 2,704,257.
- Duran Domínguez, C. 1978. Procedimiento para cocer maíz por extrusión. Registro de patente: abril 7 de 1978. Dirección general de inversiones y Marcas, Departamento de Patentes, Secretaria de Patrimonio y Fomento industrial, México.
- Dziezak, J.D. 1989. Single and twin-screw extruders in food processing. *Food Technol* 43(4) :164-179
- Enriquez, G.M.A. 1984. Introducción a la Extrusión de Alimentos. I reunión Panamericana de Extrusión de Alimentos. Chihuahua, México.
- FAO. Food Agriculture Organization. 1993. *El maíz en la nutrición humana*. Colección FAO: Alimentación y Nutrición No 25, Roma.
- FAO. 2001. *Production Yearbook*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 2003. *Base de datos Estadístico*. Roma, Italia.
- Faubion, J.M., Hosney R.C., and Seib A.P. 1982. Functionality of Grain. *A.A. Cereal Chem* 27(5): 212-216.
- Fernandez D., Waniska, R and Rooney L. 1999. Changes in Starch Properties of Corn Tortillas during Storage. *Starch/Stärke* 51 (4) 136-140.

Fernandez-Muñoz, J. L., Rodríguez, M.E., Pless R.C., Martínez-Flores, H.E., Leal M. Martínez J. L., and Baños, L. 2002. Changes in nixtamalized corn flour depend on postcooking sleeping time. *Cereal Chem* 79:162-166.

Figueroa, J.D., González Hernández, Arambula Villa., y Morales Sánchez. 1997. Tecnologías ecológicas para la producción de tortilla. *Avance y Perspectiva* 16:363-374.

Flores-Farias, R. 1997. Caracterización Físicoquímica y Reológica de Harinas Comerciales de Maíz (*Zea mays* L.) Nixtamalizado. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, México.

Flores-Farias, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., Chang, Kil Y., Hernández González, J., and Ríos Elvira. 2000. Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalized Mexican maize flours for tortillas. *J Sci Food Agric* 80:657-664.

Flores-Farias, R., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., and Ríos, E. 2002. Characterization of Commercial Nixtamalized Maize Flours. *Agrociencia* 36:557-567.

Francis, J.M. 1995. Colorimetric Properties of Foods, Cap 10 in *Engineering Properties of Foods*, edited by Rao M.A. Ed Marcel Dekker, Inc. New York U.S.A.

Gaytan, M.M., Martínez-Bustos, F and Morales, S.E. 1997. Aplicación de un proceso de conocimiento dieléctrico de maíz integral en la elaboración de harinas instantáneas de maíz amarillo para la preparación de frituras de masa y tortillas. CINVESTAV-IPN. UA: Querétaro, Querétaro México.

Gerón, F.X., Ramírez, V.P., Balderas, M.M., Sierra, M.M. y Alcáraz, A.J.J. 1978. Mejoramiento Genético de Líneas y poblaciones con el Carácter Opaco Duro en: Resultados de la Investigación en Mejoramiento Genético. SARH-INIA-CIAGOC. (Pag 19-23).

Gómez, M.H., and Aguilera, J. M. 1983. Changes in the starch fraction during the extrusion cooking of corn. *J. Food Sci.* 48:378.

Gómez, M.H., Rooney, L.W., Waniska, R., and Pflugfelder R. 1987. Dry corn masa flours for tortilla and snack production. *Cereal Foods World* 32:372-376.

Gómez, M. H., McDonough, C.M. Rooney, L.W., y Waniska, R.D. 1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *J. Food Sci* 54(2): 330-336.

- Gomez, M.H., Waniska R.D., and Rooney, L.W. 1990. Effects of nixtamalization and grinding conditions on starch in masa. *Starch/Starke* 42:475.
- Gomez, M.H., Waniska, R.D., Waniska, R.D., and Rooney, L.W. 1991. Starch characterization of nixtamalized corn flour. *Cereal Chem* 68:578-582
- Gómez, M.H., Lee, J.K., McDonough, C.M. Waniska, R.D. y Rooney, L.W. 1992. Corn starch changes during tortilla and tortilla chip processing. *Cereal Chem* 69(3): 275-279.
- Gómez Aldapa Carlos A., Martínez Bustos, F., Figueroa Cardenas. J., Ordorica Falomir C.A., Gonzalez Hernández J. 1996. Cambios en algunos componentes químicos y nutricionales durante la preparación de tortillas de maíz elaboradas con harinas instantáneas obtenidas por extrusión continua. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 46(4): 315-319.
- Gómez Noel, Sierra Mauro, Canto Miguel, Rodríguez Flavio, Manjares Margarito, Espinosa Alejandro, Betanzos Esteban, Córdova Hugo, Caballero Filiberto, Turrent Antonio, García Abraham, Ramírez Genoveva, Sandoval Alfredo, Coutiño Balmuro, Cervantes Ernesto, Reyes Cesar y Nava Lauro. 2003. V-537C y V-538C, Nuevas Variedades de Maíz con Alta Calidad de Proteína para el Trópico Mexicano. *Rev Fitotecnia Mexicana*, Vol 26 (3).
- Gonzalez, J.R. 1984. Efecto de algunas Variables de Extrusión sobre la Harina de Maíz. En Primera reunion Panamericana de Extrusion de Alimentos, CIATECH Chihuahua México. Pp 113-129.
- Gonzalez, R.J., 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.
- Gonzalez, A.U. 1995. El maíz y su conservación. Ed Trillas, S.A. México D.F.
- Gracia, A.R., y Silva E. 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. U. Sonora Hermosillo, Sonora, México.
- Guerra Morales Mariano. 2002. Efecto del Consumo de Maíz de Alta Calidad Proteínica en niño(a)s de familias indígenas de las regiones mazateca y mixe del estado de Oaxaca: Una estrategia agronomica de desarrollo entre campesinos que practican la agricultura de subsistencia. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México.
- Harper, M.J. 1981. *Extrusion of Foods*. Volume I. CRC Press, Inc. Boca Raton Florida, USA.

- Harper, J.M. 1989. Foods extruders and their applications. En "Extrusion Cooking". Cap. 1, C. Mercier, P. Linko y J.M. Harper (Ed). Pp: 1-15. American association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, EUA.
- Henika, R.G y Palmer, G.M. 1976. Response Surface Methodology in Annual Meeting American Association of Cereal Chemistry. New Orleans. AACC.
- Hill, W.G and W.G Hunter. 1966. "A Review of Response Methodology: A literature survey". Technometrics, Vol 8.
- Illescas, R. 1943. La teoría química de la formación del nixtamal. Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. 4: 129.
- INEGI. 1996 Anuario Estadístico de la Producción de Maíz. México.
- Inglett, G.E. 1970. Corn: Culture, Processing Products. Inglett G.E. (Ed). AVI Publishing Co. Westport, CT, EUA, pp 123.
- Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria (INIFAP), 2001. Descripción varietal de H-519C, H-553 C y V-537 C, Maíces con alta calidad de proteína para el trópico húmedo de México. Folleto Técnico N.30.
- Johnson, B.A., Rooney, L.W. y Khan, M.N. 1980. Tortilla-making characteristics of micronized sorghum and corn flours. J. Food Sci., 45: 671 -674.
- Johnson, M. A., and Horner, F.A. 1990. Nixtamalización of maize (*Zea Mays* L.) using a single screw cook-extrusion process on lime-treated grits. J. Sci. Food Agric. 60: 509-514.
- Kervinen, R., Linko P., Sourtti T., and Olkku J. Wheat starch extrusion cooking with acid or alkali. In : Thermal Processing and Quality of Foods. Ed by Zauthen P, Elsevier Applied Science, London (1984).
- Landry, J., et Moureaux, T. 1970. Hétérogénéité des glutélines du grain de maïs: Extraction sélective et composition en acides aminés des trois fractions isolées. Bull. Soc. Chim. Biol. 52: 1021 - 1037.
- Landry, J., and y Moureaux, T. 1982. Distribution and amino acid composition of protein fractions in opaque-2 maize grain. Phytochemistry. 21: 11365- 1869.
- Larios, Fonseca R. 2004. Aditivos e Hidocoloides en Masa de Nixtamal. Citado en I Congreso Nacional de Nixtamalización Octubre 2004. Queretaro, Mexico.
- Larkins, B.A., Danneffer, D.F, Bostwick., E.O.G.A.Moro and M.A. López. 1994. Opaque 2 modifiers, what they are and how they work. In Quality Protein Maize, 1964-1994. Proc of the international Symposium on Quality Protein Maize Embrapa/CNPMS. Sete Lagoas, MG Brasil p 133-148.

- Lawton, B.T., Henderson, G.A., y Derlatka, E.J. 1972. The effects of extruder variables on gelatinization of corn starch. *Can J Chem Eng*, 50: 168-172.
- Leach, W.H. 1965. Gelatinization of Starch. Chap XII in: *Starch Chemistry and Technology*. Vol I de by Whistler, R.L., and Paschall, E.F. Academia Press N.Y, USA.
- Leal-Diaz, A. Rooney L. Waniska R, Barron M, Riaz M. 2003. Evaluation of Extrusion Properties of Quality Protein Maize and Food Grade Maize. Cereal Quality Laboratory and Food Protein research and Development Center, Texas A&M University, College Station, TX.
- Lending C.R., y Larkins B.A. 1989. Changes in the zein composition of protein bodies during Maize endosperm development. *Plant Cell I*. 1011-1023.
- Lomeli Arturo. 1997. El consumidor ante la controversia sobre la tortilla. UNAM, México, D.F.
- Lusas, Edmund. 1988. Quality Control of Texturization Process, in: *Advances in Food extrusion Technology*. Texas USA.
- Mangelsdorf, P.C. 1986. The origin of corn. *Sci Amer* (8):72-78.
- Martínez, B. F. 1988. Obtencao de farinhas instantâneas de sorgo para tortillas pelo processo de extrusao. Tese de Duotorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Sao Paulo Brasil.
- Martínez-Bustos, F., Figueroa, J.D. y Larios, S.A. 1996a. High lysine extruded products of quality protein maize. *J Sci Food Agric* 71:151-155.
- Martínez-Bustos, F., Figueroa, J. D. C., Sánchez-Sinencio, F., González-Hernandez, J., Martínez-Montes, J.L., and Ruiz-Torres, M. 1996b. Extrusion apparatus for preparation of instant fresh corn dough or masa. United States Patent 5,558,886. Sept. 24, 1996.
- Martínez-Bustos, F., Chang Y. K., Bannwart, A., Rodriguez, M.E., Guedes P.A and Gaiotti, E.R. 1998. Effects of calcium hydroxide and processing conditions on corn meal extrudates. *Cereal Chem* 75(6)796-801.
- Martinez-Bustos F., Martinez-Flores H E., Sánchez-Sinencio F., Chang Y K., Barrera-Arellano D., Rios E. 1999. Importance of pericarp and germ on the rheological quality of masa and tortillas made from Nixtamalized Maize. *J Cereal Sci* (accepted).

- Martinez-Bustos F, García M, Chang Y, Sanchez-Siniecio and Figueroa J D. 2000. Characteristics of nixtamalised maize flours produced with the use of microwave heating during alkaline cooking. *J F Agriculture* 80:651-656.
- Martinez-Flores H., Martinez-Bustos F., Figueroa J., and Gonzalez-Hernandez J. 1998. Tortilla from Extruded Masa as Related to Corn Genotype and Milling Process. *Journal of Food Science* 63(1): 130-133.
- Martinez Herrera, M.L and Lachance, P.A. 1979. Corn (*Zea mays*) kernel hardness as an index of the alkaline cooking time for tortilla preparation. *J.Foods Science*. 44:377-280.
- Martinez-Serna., and Villota R. 1992. Reactivity, Functionality, and Extrusion Performance of Native and Chemically Modified Whey Proteins. Cited Cap 25 in *Food Extrusion Science and Technology*. New York . USA.
- Matz, S.A. 1959. *The Chemistry and Technology of Cereals as Food and Feed*. Avi Publishing Co. Westport CT. USA.
- Mc Donough, Gomez M.H, Lee J.K, Waniska R.D, Rooney L.W. 1993. Environmental Scanning Electron Microscopy Evaluation of Tortilla Chip Microstructure During Deep-Fat Frying. *Journal of Food Science* 58 (1): 199-203.
- Mendoza, F.C. 1975. Method for obtaining nixtamalized flours. United States. Patent 3,859,452. Ene.7.
- Mercier, C., and Fillet, P. 1975. Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products. *Cereal Chem* 52:283-297.
- Mercier, C., Linko, P., and Harper, J.M. 1989. *Extrusion Cooking*. American Association of Cereals Chemists Inc., St Paul, MN. USA.
- Mercier, C. 1993. nutritional appraisal of extruded foods. *Int J Foods Sci Nutr* 44:545-559.
- Mertz, E.T., Bates, L.S., y Nelson, O.E. 1964. Mutant gene that changes protein composition and increase lisen content of Maite endosperm. *Sci* 145: 279-280.
- Mertz, E.T. Nutritive value of corn and its products. Cap 18 in: *Corn: culture, processing products. Mayor feed and foods crops in agriculture and food series*. Inglet G.E. (ed). The AVI publishing, Co, Inc. Westport Connecticut, USA. 1970.
- Mian, N.R. 2000. *Extruders in Food Applications*. Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, Pennsylvania USA.

Milan-Carrillo, J., Reyes-Moreno, 2002. Alternativas Tecnológicas para al producción de harinas instantáneas de Maíz (*Zea mays* L) de Calidad proteínica y Garbanzo (*Cicer arietinum*). Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Químico Biológicas. Culiacán Sinaloa.

Milan-Carrillo J., Gutierrez-Dorado R., Perales-Sanchez J., Cuevas-Rodríguez E., Ramirez-Wong B., y Reyes-Moreno C. 2003. Extruded Quality Protein Maize (*Zea mays* L) Flour for Tortilla Preparation. Publication paper for Journal.

Milkus, M., and Hamaker R. 2003. Isolation and Characterization of Soluble Branched Starch Fraction from Corn Masa Associated Adhesiveness. *Cereal Chem* 80 (6):693-698.

Mohsenin, N.N. 1986. Physical Properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers, New York, NY, p 383-479.

Molina, M., R,Letona M. and Bressani R. 1977. Drum drying for the improved production of instant tortilla flour. *Journal of food Science* Vol 42 (6):1432.

Mondragon, M., Bello-Perez L., Agama-Acevedo E., Betancur-Ancona D., and Juan-Luis P. 2004. Effect of Cooking Time, steeping and Lime Concentration on starch Gelatinization of Corn During Nixtamalization. *Starch/Stärke* 56 :248-253.

Montemayor, E., and Rubio, M. 1983. Alkaline cooked corn flour: technology and uses in tortilla and snack products (abstr) *Cereal Foods World* 28:577.

Montgomery, Douglas. 1991. Diseño y Análisis de Experimentos. Ed Iberoamericana. E.U.A. Pp 241-284, 467-501.

Morad, M., M. Onskander, F., Y. Rooney, L., W. and Earp C., F. 1986. Phisico-chemical properties alkali-cooked corn using traditional and presoaking procedures. In *Cereal Chem.* 63(3):259

Morris, M.L., y M.A. Lopez Pereira. 2000. Impactos del mejoramiento del Maíz en America Latina 1996-1997. México D.F. CIMMYT.

Museo Nacional de Culturas Populares. 1987. El maíz, Fundamento de la Cultura Popular Mexicana. Garcia Valadez Ed. Dirección General de Culturas populares SEP, México. P 114.

Namekforoosh. 1996. Investigación de Operaciones. Ed LIMUSA México.

Noreña, F. 1995. Física de Emergencia. Pangea Editores. 1° ed. México, D.F. Pp 264-265.

Oikku, J. Hagqvist, A. and Linko, P. 1983. Steady-state modelling of extrusion cooking employing response surface methodology. *J Food Eng* 1:27-49.

Ortega, E.I., Villegas, E., and Vasal, S.K. 1986. A comparative study of protein changes in normal and quality protein Maize during tortilla making. *Cereal Chem* 63(5):446-451.

Paredes-López and Saharópulos-Paredes, 1982. Scanning electron microscopy studies in limed corn. *J Food Technol* 17:691.

Paredes-López and Saharópulos-Paredes, 1983. A review of tortilla production technology. *Bakers Digest* 57(5): 16-25.

Paredes-López, O., Serna-Saldivar, S.O., Guzman-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.*

Plugfelder, R.L. Dry matter distribution in Comercial Alkaline Cooking Process for Production of Tortilla and Snack Foods. Ph Dissertation, Texas A&M University. College Station, Tx. 110 pp.

Pons, Hernandez 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, Mexico.

Ramírez-Wong, B. 1989. Measurement and Evaluation of Textural and Reological Properties of Fresh Corn Masa. Dissertation of the degree of Doctor Philosophy. Agricultural Engineering of Texas A&M University, Texas USA.

Ramírez-Wong, B., Sweat, E.V, Torres, P.I and Rooney W.L. 1993. Development of Two Instrumental Methods for Corn Masa Texture Evaluation. *Cereal Chemistry* 70(3) 286-290.

Ramírez-Wong, B., y Ortega, F. 1994. Evaluacion de las propiedades reológicas de la masa y tortillas de maíz comerciales. *Revista de Ciencias Alimentarias* 2(1):1-8.

Ramírez-Wong, B., Silva B., Gracia R., Lauterio R., Torres P I., y Ledesma A.I. 2002. Efecto del Tiempo de Cocimiento y la Concentración de Cal sobre algunos parámetros de producción del Proceso de la Tortilla de Maíz. *Biotecnia* 4(19):31. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.

Ramos, Julia. 2004. Evolución 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. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. U. Sonora.

- Rasper, V. 1980. Theoretical aspects of amylographology. In: Shuey W.C. and K.H Triples (de) "The amylograph Handbook". AACC. St Paul Minn, USA.
- Reyes, C.P. 1990. El Maíz y su cultivo. Edit AGT Editor S.A., 1a ed. México, D.F.
- Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Gutiérrez-Dorado, R., Paredes-López, O., Cuevas-Rodríguez, E.O., and Garzón-Tiznado J.A. 2003. Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L), optimization of extrusion process. Swiss Society of Food Science and Technology 36 (2003) 685-695.
- Robles, R.R., Murray E.D., and Paredes-López O. 1988. Physicochemical changes of maize starch during the lime-heat treatment for tortilla making. Int J food sci Technol 23:91-98.
- Rodríguez, P., San Martín, M., y González de la Cruz. 2001. Calorimetría diferencial de barrido y rayos-X del almidón obtenido por nixtamalización fraccionada. Superficies y Vacío 13, 61-65.
- Rodríguez, M.E., Yañez-Limón., Alvarado-Gil J.J., Vargas, H., Sanchez-Sinencio F., Figueroa J.D.C., Martínez-Bustos, F., Martínez-Montes, J.L, González-Hernández, J., Silva, M.D., and Miranda L.C.M. 1996. Influence of the structural changes during alkaline cooking on the thermal, rheological, and dielectric properties of corn tortillas. Cereal Chem 3: 593-600.
- Rooney, L.W., and Millares-Sotres, R. 1952. Method of making a tortilla flour. Patent U.S.A. 2,5584,983.
- Rooney, L.W., y Suhedro E.L. 1999. Perspectives on nixtamalization (alkaline cooking) of maize for tortillas and snacks. Cereal Foods World 44(7):466-470.
- Rubio, M. J. 1981. Apparatus for converting grain into dough. United States Patent 4,250,802. Febrero 17, 1981.
- Rubio, M. J. 1985. Continuous production of corn products. Patent Estados Unidos 4,513,018.
- Rubio, M. J. 1993. La Industria de la harina y la tortilla de maíz. Industria Alimentaria Noviembre/Diciembre 1993. Pag. 9-19.
- SAS. 1999. Release Versión 6.08. SAS Institute. Cary NC USA.
- SAGAR. 2000. Situación actual y perspectiva de la producción de maíz en México 1996-1999. Centro de Estadística Agropecuaria, SAGAR. Pp 50.
- Saad, I. 1999. Cuadernos de Vigilancia Biotecnológica 6. Cereales. Solleiro, J.L. y Castañón, R, Ed. CambioTec, México, D.F. Pp 15-23.

- Sahai, D., Buendía, O., and Jackson, S. 2001. Analytical Techniques for Understanding Nixtamalized Corn Flour: Particle Size and Functionality Relationships in a Masa Flour Sample. *Cereal Chem.* 78 (1):14-18.
- Salinas, M., Arellano, V., y Martínez-Bustos, F. 1992. Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíces híbridos precoces para Valles Altos. *Archivos Latinoamericanos de la Nutrición* 42:161-167.
- Salinas-Moreno, Y., y Castillo-Linares, E.B. 2004. Mezcla de Maíz Normal y Maíz ceroso para Elaborar Tortillas con mayor Vida de Anaquel. CEVAMEX, INIFAP. Citado en I Congreso Nacional de Nixtamalización Octubre 2004. Querétaro, Mexico.
- Salvendy, Gabriel. 1990. Biblioteca del Ingeniero Industrial. Vol 1. Ed Grupo Noriega Editores. Mexico.
- 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 Chem.* 80 (1): 13-19.
- Sandstead, H.H., Muñoz, J.M., Jacob, R.A., Kelvay, L.M., Reck, S.J., Logan, G.M., Dintzis, F.R., Inglett, G.E. y Shvey, W.C. 1978. Influence of dietary fiber on trace element balance. *Am. J. Clin. Nutr.*, 31: 5180-5184.
- Secretaría de Economía y Fomento Industrial. 1980. NORMA MEXICANA NMX-F-046-S-1980 "HARINA DE MAIZ NIXTAMALIZADO". México D.F.
- Secretaría de Salud (SSA). 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-147-SSA1-1996, Bienes y servicios. Cereales y sus productos. Harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. México, D.F.
- Secretaría de Salud (SSA). 2001. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-187-SSA1-2001, Productos y servicios. Masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración y establecimientos donde se procesan. Especificaciones sanitarias. México, Distrito Federal.
- Seib P.A., and Stearns, M. 1972. Extrusion processing of wheat starch. (Abstr) *Cereal Sci. Today* 17(9):102.
- Serna-Saldivar S.O., Gómez, M.H., y Rooney, L.W. 1990. Technology, chemistry, and nutritional value of alkaline-cooked corn products. En "Advances in Cereal Science and Technology Vol. X. ACC. Pomeranz. Y. (Ed) pp 243-307.

- Serna-Saldivar, S.O., and Rooney, L. W. 1991a. Effect of lime treatments on the availability of calcium in dieto f tortillas and beans rat growth and balance studies. *Cereal Chem* 68 (6):565-570.
- Serna-Saldivar, S.O., and Rooney, L. W. 1991b. Effect of lime treatments on the bioavailability of calcium in dieto f tortillas and beans: Bone and plasma composition in rats. *Cereal Chem* 69(1):78-80.
- Serna-Saldivar S.O., 1996. Química, almacenamiento e industrialización de los cereales. AGT Editora S.A.. México.
- Sterner, M. H., and Zone, R. O. 1984. Method of grinding and cooking wholw grain. United States Patent 4,463,002.
- Suhedro, E.L., Almeida-Dominguez, L, Rooney L.W., Waniska R.D., Moreira R.G. 1998. Tortilla Bending Tecnique: An Objective Method for Corn Tortilla Texture Measurement. *Cereal Chem.* 75:854-858.
- Szczesniak, A.S. 1996. Textüre measurement. *Food Technology* 20:1292-1298.
- Vargas-Lopez, J.M., Paredes-Lopez, O., and Espitia, E. 1990. Evaluation of Lime Heat Treatment on some Physicochemical Properties of Amaranth Flour by Response Surface Methodology. *Cereal Chemistry* 67(5):417-421.
- Vargas-Lopez, J.M., Paredes-Lopez, O., and Ramirez-Wong, B. 1991. Physicochemical Properties of extrusion-Cooked Amaranth Under Alkaline Conditions. *Cereal Chemistry* 68 (6): 610-613.
- Vasal, S.K. 1994. High quality protein corn in: Specialty corn A.R. Hallauer Ed. CRC Press. Boca Ratón Fl. p75.
- Vasquez, L.F. 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 Maestria. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. U.Sonora. Hermosillo Sonora, México.
- Villalba, A. 1989. Development of dry cook process for corn dry masa flour. Ph.D. dissertation, Texas, A&M University, Collage Station. U.S.A.
- Wang, S.S., Chiang, W.C., Zheng, X., Zhao, B., y Cho, M.H. 1992. Application of energy equivalent Concept to Study of the Kinetics of starch Conversion during extrusion. En "Extrusion cooking Science and Technology". Pp 165-176. Kokoni J.L., Ho C.T., y Karwe, M.V. Ed. Marcel Dekker, New York, NY, EUA.