



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y  
TECNOLOGÍA AVANZADA**

**AREA ALIMENTOS**

**Nixtamalización por extrusión de las fracciones del  
grano de maíz para la obtención de harinas  
instantáneas.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

**PRESENTA:  
ING. YADIRA YAÑEZ ORTEGA.**

México, D. F. Junio de 2005.





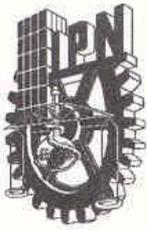
**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**COORDINACION GENERAL DE POSTGRADO E**  
**INVESTIGACION**

En la Ciudad de **México D. F.** el día **01** del mes de **Junio** del año **2005**, el (la) que suscribe **Yadira Yañez Ortega** alumno (a) del Programa de **Maestría en Tecnología Avanzada** con número de registro **021760**, adscrito a **CICATA- Unidad Legaria**, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Eduardo San Martín Martínez** y cede los derechos del trabajo intitulado **“Nixtamalización por extrusión de las fracciones del grano de maíz para la obtención de harinas instantáneas”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **email: yadirayy@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Yadira Yañez Ortega

Nombre y firma



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 11:00 horas del día 27 del mes de MAYO del 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA Legaria para examinar la tesis de grado titulada:

**Nixtamalización por extrusión de las fracciones del grano de maíz para elaboración de harinas Instantáneas**

Presentada por el alumno:

**Yañez**

Apellido paterno

**Ortega**

materno

**Yadira**

nombre(s)

Con registro: 

0	2	1	7	6	0
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **Maestro en Tecnología Avanzada**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Eduardo San Martín Martínez

M. C. Mónica Rosalía Jaime Fonseca

Dr. José Luis Fernández Muñoz

Dr. Samuel Siles Alvarado

Dr. José Antonio Calderón Arenas

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José Antonio Irán Díaz González



CENTRO DE INVESTIGACION  
Y TECNOLOGIA AVANZADA

## **DEDICATORIA**

**A DIOS.**

**POR PERMITIRME SEGUIR SUPERANDOME.**

**A MIS HIJOS JORGE Y KARLA Y A MAMI POR COMPRENDEME DURANTE  
ESTE TIEMPO MUY EN ESPECIAL A SERGIO A. POR DARME SU  
CONFIANZA, AMISTAD Y CARIÑO DURANTE TODOS ESTOS AÑOS**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Mis más sinceros agradecimientos a todos aquellos que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación**

**Dr. Eduardo San Martín Martínez** por su paciencia y dedicación en la asesoría técnica y científica en el desarrollo de la investigación.

**Dr. Samuel Siles Alvarado, M.C Mónica Rosalía Jaime Fonseca, Dr. José Luís Fernández Dr. Antonio Calderón Arenas** por su amistad y apoyo incondicional.

Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (**CICATA-IPN**) del Instituto Politécnico Nacional y a su director **Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora** por su apoyo institucional.

Al personal del Laboratorio de Pruebas Físicas **Miguel López E y Juanita Jaimes** por su ayuda en el trabajo experimental

A mis amigos **Miguel Aguilar Méndez, Georgina Cabían, Moni Centeno, Noe, Orlando Beltrán, María Eugenia, Dora Luz, Patricia Rodríguez, Hernán, Patricia Jaramillo, Lourdes Mejía F, Laurita** por haberme brindado su amistad incondicional

**Lety Cardona** por su gran apoyo en los tramites y gestión de becas y apoyos para los estudiantes

<b>INDICE GENERAL</b>	
<b>DEDICATORIA</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iii</b>
<b>INDICE GENERAL</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>viii</b>

	<b>Página</b>
<b>I INTRODUCCIÓN.</b>	17
<b>II. ANTECEDENTES.</b>	19
2.1 Importancia del maíz en México.	19
2.1.2 Demanda Total Aparente de maíz en México.	20
2.2 El maíz	21
2.2.1 Composición	22
2.2.1.1 Estructura del almidón	23
2.2.1.2 Proteínas.	24
2.2.1.3 Lípidos	24
2.3 Descripción del proceso de nixtamalización tradicional.	24
2.4 Principales cambios fisicoquímicos que sufre el grano de maíz durante la nixtamalización.	26
2.4.1 Gelatinización	27
2.4.2 Retrogradación	28
2.4.3 Proteínas.	29
2.4.4 Lípidos.	30
2.5 Proceso industrial para obtención de harina de maíz nixtamalizado.	30
2.5.1 Antecedentes	30
2.5.2 Descripción del proceso industrial	31
2.6 Procesos alternativos en la nixtamalización del grano de maíz.	34
2.6.1 Nixtamalización tradicional con vapor.	34
2.6.2 Nixtamalización con Pre- remojo	34
2.6.3 Nixtamalización tradicional con cocción a presión.	34
2.6.4 Procesos continuos y discontinuos (por lotes)	35
2.6.5 Método con cámara de vapor	35
2.6.6 Proceso de cocción en microondas, infrarroja (IR) o radio frecuencia	36
2.6.7 Nixtamalización por cocción dieléctrica	36
2.6.8 Nixtamalización fraccionada o selectiva.	36
2.6.9 Nixtamalización fraccionada del grano de maíz	37
2.7 El proceso de extrusión como una alternativa en la obtención de harinas nixtamalizadas.	37

<b>III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.</b>	42
<b>IV. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO</b>	43
<b>V. OBJETIVOS</b>	45
5.1 Objetivo General	45
5.2 Objetivos específicos	45
<b>VI. MATERIALES Y METODOS.</b>	46
<b>6.1 Acondicionamiento del grano de maíz.</b>	47
<b>6.1.1 Caracterización del grano de maíz.</b>	47
<b>6.1.2 Determinación del Índice de Acidez y porcentaje de humedad del grano</b>	47
<b>6.1.3 Dureza del grano de maíz.</b>	48
<b>6.2 Proceso de descascarado del grano entero de maíz.</b>	48
<b>6.2.1 Proceso de separación de las fracciones del grano de maíz (endospermo y PGP) para la elaboración de las harinas</b>	49
<b>6.3 Procesos de obtención de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las Fracciones de Grano de Maíz (FGM)</b>	50
<b>6.3.1 Acondicionamiento de las harinas para el proceso de extrusión de las FGM.</b>	50
<b>6.3.2 Proceso de extrusión de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.</b>	51
<b>6.3.3 Secado</b>	52
<b>6.3.4 Molienda, envasado y almacenado de las muestras.</b>	53
<b>6.4 Análisis de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM</b>	53
<b>6.4.1 Viscosidad.</b>	53
<b>6.4.2 Índice de Solubilidad en Agua (ISA) e Índice de Absorción de Agua (IAA)</b>	53
<b>6.4.3 Determinación del índice de acidez.</b>	54
<b>6.4.4 Determinación de la transición de fase por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)</b>	56
<b>6.5 Elaboración de tortillas con harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión de las (FGM) y tradicional.</b>	57
<b>6.5.1 Determinación de la consistencia en masas comerciales.</b>	57
<b>6.5.2 Acondicionamiento de la masa a partir de harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM</b>	58
<b>6.5.3 Elaboración de las tortillas.</b>	58
<b>6.6 Determinación del análisis de textura, rolabilidad e inflado en las tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión y tradicional.</b>	59
<b>6.6.1 Análisis de compresión en tortillas.</b>	59
<b>6.6.2 Análisis de extensión en tortilla.</b>	60
<b>6.6.3 Determinación de rolabilidad.</b>	61
<b>6.6.4 Inflado</b>	62
<b>6.7 Diseño de experimentos y análisis estadístico.</b>	62
<b>6.7.1 Modelo de predicción para el diseño empleado en el proceso de separación de las fracciones del grano de maíz (descascarado).</b>	63
<b>6.7.2 Modelo de predicción para el diseño empleado en la nixtamalización por extrusión de las FGM.</b>	63

<b>VII. RESULTADOS.</b>	64
7.1 Resultado del proceso de descascarado del grano de maíz.	64
7.1.1 Análisis de varianza de los resultados del proceso de descascarado	65
7.1.2 Análisis de Superficie de respuesta del proceso de separación de PGP.	66
7.2 Resultados experimentales, análisis de varianza y modelos de regresión obtenidos de las variables respuesta analizadas en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM	66
7.2.1 Resultados experimentales de las variables respuestas	67
7.2.2 Análisis de varianza y modelos de regresión de las variables respuestas evaluadas en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM	68
7.2.3 Análisis de resultados de las variables respuestas obtenidas a partir de la evaluación de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.	70
7.2.3.1 Viscosidad	70
7.2.3.2 Viscosidad máxima a 90°C: Análisis de varianza y superficie de respuesta	72
7.2.3.3 Viscosidad a 50°C: Análisis de varianza y superficie de respuesta	74
7.2.3.4 Índice de Solubilidad en Agua (ISA): Análisis de varianza y superficie de respuesta	76
7.2.3.5 Índice de Absorción de Agua (IAA): Análisis de varianza y superficie de respuesta	79
7.2.3.6 Temperatura de Fusión (TM): Análisis de varianza y superficie de respuesta	81
7.2.3.7 Índice de acidez: Análisis de varianza y superficie de respuesta	84
7.3 Análisis del perfil de textura en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM y masa (proceso comercial y tradicional)	86
7.3.1 Análisis del Perfil de textura de fuerza de compresión de las tortillas elaboradas con masa comercial y tradicional.	86
7.3.2 Análisis del Perfil de textura de fuerza de extensión de las tortillas elaboradas con masa comercial y tradicional.	88
7.3.3 Análisis del Perfil de textura de la fuerza de compresión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.	88
7.3.4 Análisis del Perfil de textura de la fuerza de extensión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.	90
7.4 Resultados experimentales, análisis de varianza y modelos de regresión obtenidos de las variables respuesta analizadas en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM	91
7.4.1 Resultados experimentales de las variables respuestas	91
7.4.2 Análisis de varianza y modelos de regresión	93

7.4.3	Fuerza de Compresión (N): Análisis de varianza y superficie de respuesta	95
7.4.4	Fuerza de extensión (N): Análisis de varianza y superficie de respuesta	97
7.4.5	Rolabilidad: Análisis de varianza y superficie de respuesta	99
7.4.6	Inflado: Análisis de varianza y superficie de respuesta	101
<b>VIII. CONCLUSIONES</b>		104
		106
<b>IX. RECOMENDACIONES</b>		107
<b>X. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b>		
<b>XI. ANEXOS</b>		114

<b>INDICE DE TABLAS.</b>	<b>Página</b>
<b>Tabla 1</b> Diseño de experimentos empleado en el descascarado del grano de maíz.	48
<b>Tabla 2</b> Diseño de experimentos para el proceso de extrusión	50
<b>Tabla 3</b> Resultados obtenidos durante el proceso de descascarado del grano de maíz.	64
<b>Tabla 4</b> Análisis de varianza del proceso de descascarado del grano de maíz	65
<b>Tabla 5</b> Promedios de los resultados experimentales de las variables respuesta obtenidas de las muestras de harina nixtamalizadas por extrusión de las FGM	67
<b>Tabla 6</b> Análisis de varianza obtenidos de las variables respuesta en las harinas NEFGM	68
<b>Tabla 7.</b> Modelos de regresión obtenido del análisis de varianza de las variables respuestas en harinas NEFGM	69
<b>Tabla 8</b> Promedio de los resultados experimentales de las variables respuesta obtenidas en tortillas elaboradas con harina nixtamalizadas por extrusión de las FGM.	92
<b>Tabla 9</b> Análisis de varianza obtenidos de las variables respuesta en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión de las FGM	93
<b>Tabla 10</b> Modelos de regresión obtenido del análisis de varianza de las variables respuestas en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM	94

<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> Demanda total Aparente de maíz a nivel nacional.	20
<b>Figura 2</b> Consumo Anual de Maíz Blanco	21
<b>Figura 3</b> Viscoamilograma de los principales cambios fisicoquímicos que experimenta el almidón.	28
<b>Figura 4</b> Diagrama de flujo del proceso industrial de producción de harinas nixtamalizadas	32
<b>Figura 5</b> Etapas del desarrollo experimental del proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM para la obtención de harinas	35
<b>Figura 6</b> Curva fuerza-distancia obtenidas en ensayos de resistencia a la penetración	61
<b>Figura 7</b> superficie de respuesta del proceso de descascarado del grano de maíz	66
<b>Figura 8</b> Viscoamilogramas de harinas nixtamalizadas elaboradas por el proceso NEFGM M1-M15 y por el proceso tradicional HMNT.	71
<b>Figura 9</b> Superficies de respuesta de la viscosidad máxima a 90°C en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C., b) 110 °C y c) 126 °C.	72
<b>Figura 10</b> Graficas de superficie de respuesta de la viscosidad máxima a 50°C en harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93°C, b) 110°C, c) 126°C	75
<b>Figura 11</b> Graficas de superficies de respuesta del índice de solubilidad en agua en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a diferente temperatura a) 93°C, b) 110 °C y c) 126 °C.	76
<b>Figura 12</b> Graficas de superficies de respuesta del índice de absorción de agua en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C b)110°C y c)126 °C.	80
<b>Figura 13</b> Graficas de superficies de respuesta de la temperatura de fusión(Tm) de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C	82

<b>Figura 14</b>	Graficas de superficies de respuesta del índice de acidez (mg KOH/ 100g muestra seca) en harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C	85
<b>Figura 15</b>	Fuerza de compresión de cuatro muestras de tortillas elaboradas con masa comercial (T1-T4) y harina nixtamalizada por el proceso tradicional (T5) de la región de Tlaxcala.	86
<b>Figura 16.</b>	Fuerza de extensión de cuatro muestras de tortillas elaboradas con masa comercial y una de harina de maíz nixtamalizado de la región de Tlaxcala.	88
<b>Figura 17a,b,c</b>	Gráficos de fuerza de compresión de tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM	89
<b>Figura 18</b>	Gráficos de la fuerza de extensión de las tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM	90
<b>Figura 19</b>	Graficas de superficies de respuesta de la fuerza de compresión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C	96
<b>Figura 20</b>	Graficas de superficies de respuesta de la fuerza de extensión en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C	98
<b>Figura 21</b>	Graficas de superficies de respuesta de la capacidad de rolabilidad que presentan las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C	100
<b>Figura 22</b>	Graficas de superficies de respuesta del porcentaje de inflado en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C	102

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un nuevo proceso de nixtamalización por extrusión utilizando diferentes concentraciones de las fracciones de grano de maíz (endospermo y PGP Punta, Germen Pericarpio), evaluando los principales cambios fisicoquímicos, reológicos y de textura que se presentan en las harinas y tortillas elaboradas en el proceso (Viscosidad máxima a 90 y 50°C, Índice de Absorción en Agua, Índice de Solubilidad en Agua, Temperatura de fusión e índice de acidez, Fuerza de compresión, fuerza de extensión, rolabilidad e inflado) con la finalidad de establecer las condiciones óptimas para la elaboración de una harina instantánea con buenas propiedades para la elaboración de tortillas con características similares a las obtenidas por el proceso de nixtamalización tradicional pero eficiente en el consumo de agua y tiempo de proceso.

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en dos etapas la primera consistió en encontrar las condiciones óptimas para el proceso de separación de los componentes (endospermo y PGP) de grano de maíz (descascarador continuo patentado por CICATA-IPN) evaluando tiempo y temperatura de remojo mediante un diseño de experimentos <sup>2</sup>. La segunda etapa consistió en nixtamalizar las harinas a diferentes temperaturas de extrusión 93°C-126°C, porcentajes de humedad (26-43%) y concentraciones de PGP (0-15%), para el desarrollo de esta etapa se empleó un diseño de experimento (Diseño Central Compuesto <sup>3</sup>). Las muestras se procesaron en un extrusor de tornillo simple patentado por CICATA-PN donde la velocidad del tornillo y la concentración de Ca(OH)<sub>2</sub> fue constante para todas las muestras 50 rpm y 0.7% p/p respectivamente.

La temperatura, el porcentaje de humedad y la concentración de PGP afecta de manera significativa las propiedades fisicoquímicas, reológicas y de textura en las harinas y tortillas elaboradas por el proceso de extrusión de las fracciones del grano de maíz. La extrusión a baja temperatura (93°C) favorece el aumento de la viscosidad a 90 °C, IAA, T<sub>m</sub>, índice de acidez y la disminución de la viscosidad a 50, ISA en las harinas acondicionadas con bajas concentraciones de PGP (0%) y con porcentajes de humedad entre 32-38%. Las tortillas

elaboradas en estas harinas presentaron buenas características texturales (valores aceptables de rolabilidad e inflado, mayor resistencia a la fuerza de compresión y extensión); sin embargo concentraciones altas de PGP (15%) y porcentajes altos y bajos de humedad (44 y 26%) disminuyen de manera importante las características de textura en las tortillas.

Las harinas extrudidas a altas temperaturas presentaron características fisicoquímicas y reológicas inferiores a las extrudidas a 93°C y por consiguiente textura inferiores en las tortillas elaboradas por el proceso tradicional. En general las altas temperaturas de extrusión, altas concentración de PGP y altos porcentajes de humedad disminuyen las características de textura en las tortillas elaboradas por extrusión de las fracciones del grano de maíz.

La acidez de las harinas se incrementa en función de la concentración de PGP y porcentajes de humedad entre 32-40 %, favoreciendo la liberación de ácidos grasos durante el proceso, incrementando la acidez. Sin embargo el incremento de la temperatura durante la extrusión favorece la disminución del índice de acidez, principalmente a temperaturas de 126°C en estas condiciones se alcanzan los menores valores de índice de acidez, lo que aumentaría la vida de anaquel de la harinas nixtamalizadas por este proceso.

## ABSTRACT

The present investigation had as objective to develop a new nixtamalización process for extrusion using different concentrations of the fractions of grain of corn (endosperm and PGT Tip cap, Germ Pericarp), evaluating the main changes physical chemicals, rheological and of texture that you presented in the flours and tortillas elaborated in the process (maximum Viscosity at 90 and 50°C, Water Absorption Index, Water, Solubility Index, melting Temperature, acidity index, compression force, extension force, rolabilidad and inflated) with the purpose of establishing the good conditions for the elaboration of an instantaneous flour with good properties for the elaboration of tortillas with characteristic similar to those obtained by the process of traditional but efficient nixtamalización in the consumption of water and time of process.

The development of the investigation you carries out in two stages the first one he/she consisted on finding the good conditions for the process of separation of the components (endosperm and PGT) of grain of corn (continuous descascarador patented by CICATA-IPN) evaluating time and soaking temperature by means of a design of experiments <sup>2</sup>. The second stage consisted on nixtamalizar the flours to different extrusion temperatures 93°C-126°C, percentages of moisture (26-43%) and concentrations of PGT (0-15%), for the development of this stage you employment an experiment design (Design Compound Central <sup>3</sup>). The samples were processed in a single Twin-Screw extruder patented by CICATA-PN where the speed of the screw and the concentration of Ca(OH)<sub>2</sub> was constant for all the samples 50 rpm and 0.7% p/p respectively.

The temperature, the percentage of moisture and the concentration of PGT affects in a significant way the properties physical - chemicals, rheological and of texture in the flours and tortillas elaborated by the process of extrusion of the fractions of the grain of corn. The extrusion to low temperature (93°C) it favors the increase from the viscosity to 90 °C, IAA, T<sub>m</sub>, acidity index and the decrease of the viscosity at 50 °C, ISA in the flours conditioned with low concentrations of PGP (0%) and with percentages of moisture among 32-38%.

The tortillas elaborated in these flours presented good characteristic textural (you value acceptable of rolabilidad and puffing, bigger resistance to the compression force and extension); however high concentrations of PGP (15%) and high percentages of moisture (44 and 26%) they reduce important the texture characteristics in the tortillas.

The flours extruder to high temperatures presented characteristic physical chemicals and inferior rheological to the extruder at 93°C and consequently texture inferior in the tortillas elaborated by the traditional process. In common the high extrusion temperatures, high concentration of PGT and high percentages of moisture reduce the texture characteristics in the tortillas elaborated by extrusion of the fractions of the grain of corn.

The acidity of the flours is increased in function of the concentration of PGT and percentages of moisture among 32-40%, favoring the liberation of fatty acids during the process, increasing the acidity. However the increment of the temperature during the extrusion favors the decrease of the acidity index, to temperatures of 126°C under these conditions the smallest values of acidity index are reached, what the life of shelf of the flours nixtamalizadas would increase for this process.

## **I. INTRODUCCIÓN.**

El maíz junto con el trigo y el arroz es uno de los cereales más importantes del mundo, suministra elementos nutritivos a los seres humanos, animales y esta considerado como una de las materias primas esenciales para algunas industrias como la del almidón, aceitera, alcohólica, edulcorantes y recientemente la de los combustibles. (FAO., 2004)

En México el maíz ha sido y seguirá siendo el cultivo más importante para los mexicanos, su importancia va más allá de su contribución a la dieta y a la economía familiar, este representa nuestras tradiciones y costumbres que conforman la cultura que nos identifica como nación.

La tortilla es el alimento básico en la población de nuestro país y el grano de maíz es la materia prima fundamental para su elaboración. Se estima que el consumo per cápita de tortilla en medio rural supera los 125 kg., y en las comunidades más pobres del país el consumo per cápita de la tortilla puede llegar a 200 kg. (Cámara Nacional del Maíz industrializado 2003)

La tecnología para la elaboración de las tortillas ha sido transmitida de generación en generación siguiendo básicamente los mismos pasos y procedimientos utilizados por los aztecas, aun que la modernización industrial del proceso ha mejorado y modernizado el proceso este sigue teniendo varios inconvenientes como la demanda de gran cantidad de mano de obra, altos consumos de energía y agua, reflejándose en altos costo de producción (Vaqueiro; et al; 1986; Martínez-Bustos; et al 1996; Galicia; 2002; Jaime. 2003 y Moreno et., al 2003)

La nixtamalización es un procedimiento de antigüedad milenaria que logra la cocción del grano de maíz en agua con cal, el producto obtenido llamado nixtamal se lava con agua para eliminar el exceso de cal, este se moltura en molinos de piedra para obtener una pasta suave y cohesiva conocida como

masa que es empleada para la elaboración de las tortillas (Bello Pérez., et al 2002)

La creciente expansión demográfica del país hace que la generación de alimentos se lleve a cabo en tiempos más cortos, lo que significa el desarrollo de nuevas tecnologías que cumplan con este objetivo, en México la producción de tortillas debe ser cada día más eficiente de tal manera que no se generen problemas sociales (Flores-Farías et; al; 2000). Sin embargo el estudio de nuevas alternativas desarrolladas para mejorar o sustituir el proceso de nixtamalización tradicional (Molina et., al.,1977., Bazua., et., al.,1979., Martínez-Bustos et al., 1996., Almeida-Domínguez et., al 1996., Galicia et., al., 2002 y Jaime 2003) en las ultimas décadas solo ha permitido entender algunos fenómenos que ocurren durante la nixtamalización tradicional tales como la gelatinización y retrogradación del almidón (componente mayoritario del grano) en la elaboración de masa y harinas. Actualmente no se ha logrado desarrollar una tecnología que sustituya al proceso de nixtamalización tradicional, pues los resultados tanto el la masa como en tortilla no cumplen con las características fisicoquímicas y reológicas requeridas por los consumidores, razón por la que se debe generar nuevos procesos alternativos que permitan sustituir y/o mejorar la optimización del proceso tradicional sin afectar las características de calidad final en los productos elaborados.

## **II. ANTECEDENTES.**

### **2.1 Importancia del maíz en México.**

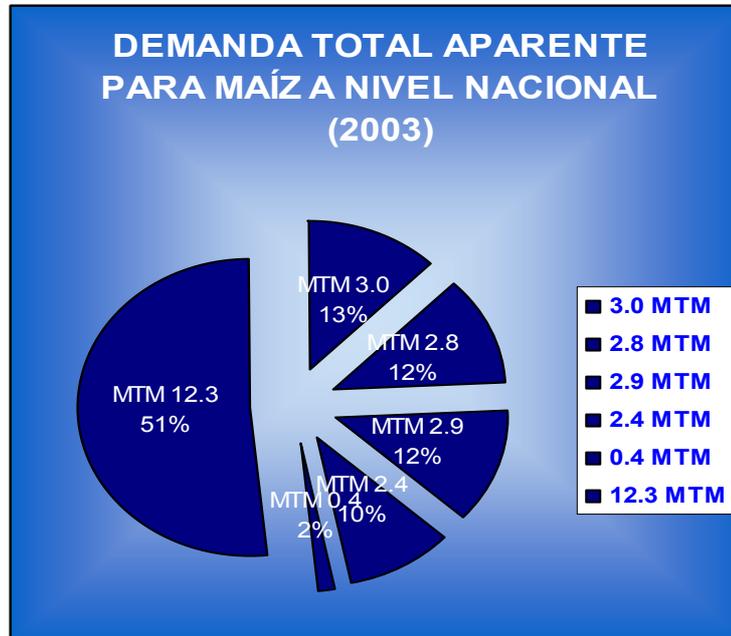
El maíz contiene casi todos los nutrimentos necesarios para la alimentación del ser humano, su concentración cambia según la variedad y las condiciones ambientales y de manejo presentadas durante su desarrollo y crecimiento; en México se producen una gran variedad de tipos de maíz los cuales tienen una composición promedio del 70% de hidratos de carbono, 8% de proteínas, 4% de minerales, 4% de lípidos, 3% de celulosa (Pérez Delgado 1996).

Con el consumo de maíz la población mexicana satisface entre un 60 y 75 % de sus necesidades energéticas, un 60% de las proteínas y 87% de calcio total cuando se consume en forma de tortilla (Paredes López 1992).

Las tortillas suministran el 70% de las calorías y el 50% de las proteínas que se consumen en la dieta diaria y suministra el 37% del calcio requerido por los adultos (Flores-Farías., 2000)

El maíz como todos los cereales presenta deficiencia en los aminoácidos esenciales lisina y triptofano, vitaminas del complejo B y niacina que previene la pelagra y que es sintetizada a partir del triptofano. La nixtamalización implica un tratamiento selectivo de las proteínas del maíz que incrementa el balance de aminoácidos esenciales y libera niacina que de otra manera permanece no disponible.

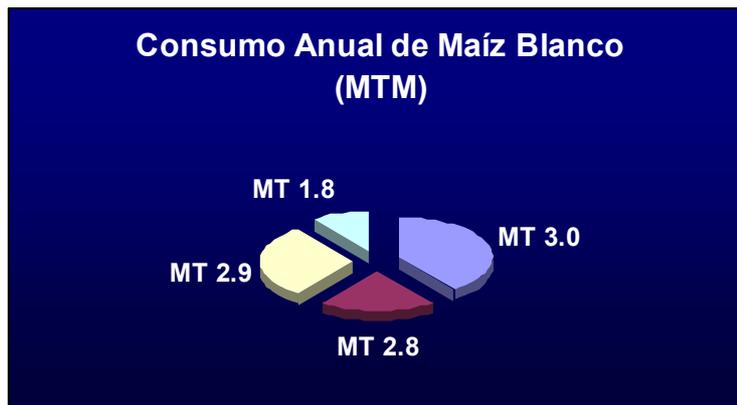
### 2.1.2 Demanda Total Aparente de maíz en México.



Cámara Nacional del Maíz Industrializado 2003

**Figura 1 Demanda total Aparente de maíz a nivel nacional.**

En la figura 1 se muestra la demanda total aparente para maíz a nivel nacional en el 2003 la cual fue de 23.8 MTM de las cuales se distribuyeron de la siguiente manera: 3.0 MTM (Millones de Toneladas Métricas) de maíz requeridos por la industria harinera, 2.8 MTM por industria de la masa y la tortilla, 2.9 MTM por el sector rural método tradicional (autoconsumo), 2.4 MTM por la industria del almidón y sus derivados, 0.4 MTM por la industria de cereales y botanas y finalmente 12.3 MTM por el sector agropecuario (Cámara Nacional del Maíz Industrializado 2003)



Cámara Nacional del Maíz Industrializado 2003

**Figura 2 Consumo Anual de Maíz Blanco**

El consumo anual a nivel nacional de maíz blanco en el 2003 (Figura 2) fue de 10.5 millones de toneladas lo que represento el 45 % de la demanda total la cual se distribuye de la siguiente manera: 3.0 MTM se emplea en la elaboración de harinas nixtamalizadas, 2.9 MTM son consumidas en el sector rural (consumo domestico), 2.8 en la elaboración de tortillas por el proceso tradicional (consumo comercial) y finalmente 1.8 MTM son destinadas para la alimentación de animales del sector rural. La mayor demanda de maíz amarillo proviene de las industrias agropecuarias con una demanda anual de 10.0 MTM de producto, 2.2 MTM de la industria del almidón y sus derivados y de 0.4 MTM de la industria de cereales y botanas (incluyendo grits). (Cámara Nacional del Maíz Industrializado 2003).

## 2.2 El maíz

### 2.2.1 Composición

El grano de maíz divide fundamentalmente en cuatro partes: 1) pericarpio, 2) aleurona, 3) Endospermo y 4) germen., en términos de porcentaje en relación al peso del grano el pericarpio representa 3-5%, aleurona 2-3%, endospermo 80-85 y el germen 10-12%. Las especies químicas más significativas en el grano son: 1) pericarpio: himicelulosa (67%), celulosa (23%), grasa (3.7%) y lignina (0.1)., 2) endospermo: almidón (87%) y proteínas (8%); 3) germen:

lípidos (33%), proteína (18%), fibra (9%), minerales (10%), Azúcares (10%) y almidón (8%)., 4) aleurona: Proteína (19%) (FAO., 1993)

### **2.2.1.1 Estructura del almidón**

La mayoría de los cereales están constituidos principalmente por almidón el cual se encuentra almacenado principalmente en el endospermo del grano y en una menor proporción en el germen y el pericarpio (Rodríguez et; al; 2001).

La mayoría de los almidones contienen entre 20-30% de amilosa y 80-90% de amilopectina, algunos almidones especialmente los de algunas variedades cerosas de maíz y sorgo contiene menos del 1% de amilosa (Manners; 1985; Boyer and Shannon, 1987; Fernández-Muños; et; al; 2001).

La estructura del almidón esta formada principalmente por una mezcla poliméricas constituida esencialmente por moléculas  $\alpha$ -D-glucosas lineales poco ramificadas (amilosa) Thomas and William; (1999) y ramificadas (amilopectina) otros constituyentes como lípidos, proteínas, fósforo que contribuyen en las propiedades funcionales del almidón (Gallear and Browler, 1987). La estructura de la amilosa esta formada en su mayor parte por cadenas lineales de glucosas unidas por enlaces  $\alpha$  (1, 4) que tienen la propiedad de adquirir una conformación tridimensional helicoidal que sirve como base en la inclusión de algunos compuestos que adopten una estructura lineal como los ácidos grasos (Biliaderis et al., 1985). La amilopectina presenta una estructura ramificada, formada por una estructura central similar a la amilosa de la cual se desprenden unidades secundarias de unidades de glucosas unidas por  $\alpha$  (1.6), localizadas cada 15-25 unidades lineales de glucosa. (Thomas and William; 1999).

### **2.2.1.2 Proteínas.**

La concentración de proteínas en el grano de maíz varía entre 8-11% con respecto al peso de grano, localizadas en el germen y endospermo., estas son consideradas de bajo valor nutricional debido a su escaso contenido de aminoácidos esenciales (lisina y triptofano) (Lásztity., 1984., Hosoney., 1991). Las proteínas localizadas en el germen contienen concentraciones altas de aminoácidos esenciales, Sin embargo estas representan solo el 20% del total del grano. La zeína tienen cantidades insuficientes de lisina y triptofano representa el 50% de la proteína total del endospermo.

### **2.2.1.3 Lípidos**

El germen de maíz esta formado del 33% de lípidos distribuidos en relación a su porcentaje en peso en los siguiente ácidos grasos: 43.5% oleico., 36.6 palmítico., 15.95 esteárico., 3.04 linolénico., 0.92 araquídico y 0.68 mirístico. En general los lípidos constituyen un 3-7% del peso del grano y su composición en términos de ácidos grasos libres en base a % en peso en: ácido mirístico ( $C_{13}H_{27}CO_2H$ ) 1-2%., ácido palmítico ( $C_{15}H_{31}CO_2H$ ) 7-11%., ácido esteárico ( $C_{17}H_{35}CO_2H$ ) 3-4%, ácido oleico ( $C_{17}H_{33}CO_2H$ ) 25-35%, ácido linolénico ( $C_{17}H_{31}CO_2H$ ) 50-60% otros ( $>C_{18}$ ) 1-2% (Pflugfelder et., al 1988a )

## **2.3 Descripción del proceso de nixtamalización tradicional.**

Diversos investigadores han descrito el método empleado para cocinar el maíz en las zonas rurales de los países consumidores de la tortilla, el primero en describir el proceso de nixtamalización fue Illescas en (1943). Este proceso consiste en mezclar una parte de maíz con dos partes de una solución de hidróxido de calcio a una concentración del 1% (esta mezcla se calienta hasta alcanzar una temperatura de 80 °C durante un lapso 20–50 min dependiendo del tipo y variedad de maíz (Martínez-Herrera and Lachance 1979), posteriormente es sometido a una etapa de reposo de 10-14 hs. Transcurrido

el tiempo se decanta el líquido denominado nejayote, el maíz nixtamalizado pasa por un sistema de lavado hasta que este quede sin residuos de la solución de cal.

La adición de cal en las fases de cocción y de remojo contribuye a eliminar las cubiertas seminales del grano de maíz disminuyendo la cantidad de fibra en la masa y las tortillas elaboradas por este proceso (Cory and Bruce., et., al 1997., Martínez-Bustos., et., al 2001)

Durante el proceso de nixtamalización tradicional el contenido de grasa se reduce debido a la saponificación e hidrólisis alcalina de los ácidos grasos (principalmente el ácido linoleico), se propicia una pérdida importante de fibra, ya que durante la nixtamalización se desprende gran parte del pericarpio del grano de maíz, el cual es eliminado durante el lavado del maíz cocido (Pérez. 1996). Así mismo existe una disminución importante de algunas vitaminas y proteínas que son solubles en condiciones térmico alcalinas como es el caso de las gluteninas (Vivas et., al,1987); sin embargo la calidad de las proteínas que permanecen en el nixtamal mejora notablemente debido a la disponibilidad de algunos aminoácidos en las fracciones pépticas después de la hidrólisis de las proteínas (Pérez. 1996).

A pesar de la pérdida de algunos nutrientes durante el proceso de nixtamalización tradicional en este se generan las condiciones óptimas para la interacción de los componentes necesarios que provee las características fisicoquímicas, reológicas, de textura y sensoriales, de las cuales depende la calidad final del producto (masa, tortilla, botana etc.,) (Arámbula., et., al., 2001) Antiguamente la obtención de masa se realizaba mediante una molienda artesanal la cual consistía en colocar el grano cocido o nixtamalizado en una piedra denominada metate donde se reducía el tamaño de la partícula hasta obtener una masa de consistencia fina. La elaboración de las tortillas consiste en tomar una porción de masa de aproximadamente de 50 g tornearla manualmente hasta obtener un disco de tamaño y grosor variado (FAO, 2004).

## **2.4 Principales cambios fisicoquímicos que sufre el grano de maíz durante la nixtamalización.**

La transformación del maíz en tortilla requiere de un proceso en el que se utiliza agua, calor, e hidróxido de calcio., estos tres elementos influyen directamente en la composición del maíz elaborado (nixtamal) da lugar a cambios en el contenido de nutrientes por la pérdida de sólidos (pericarpio., perdidas estimadas entre un 10-13.9 %) generadas por la destrucción de algunos elementos nutritivos y de la transformación de otros (Bressani 1958., FAO 2005.)

En el proceso de la nixtamalización la cal debilita las paredes celulares del grano de maíz facilita la eliminación del pericarpio, solubiliza las paredes celulares del endospermo periférico, da lugar a una hinchazón y destrucción parcial de los gránulos de almidón y modifica la apariencia de los cuerpos proteicos (Pflugfelder et., al 1988a., Gómez et., al 1989). El contenido de lípidos en el grano de maíz varia del 33 al 43 % de los cuales del 11.8 al 18.1 % se pierden durante la nixtamalización y del 25 al 50% de los lípidos de la masa se encuentran como libres y parcialmente emulsificados (Pflugfelder et al 1988b).

Durante el cocimiento del grano (nixtamalización) se originan reacciones bioquímicas importantes que modifican las características fisicoquímicas, microbiológicas, texturales y reológicas de la masa (Rodríguez., et., al 1995). A diferencia de la masa de trigo que sus propiedades reológicas y texturales se deben principalmente a las modificaciones que sufren las proteínas que lo conforman, el mayor porcentaje de los cambios ocurridos durante la nixtamalización se debe a las modificaciones que sufre el almidón principal componente del grano de maíz (72-78%), (Arámbula Villa., et al 2001).

### 2.4.1 Gelatinización

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a que su estructura es altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad debido a las múltiples interacciones que existen entre sus dos polisacáridos (Badui; 1999).

La gelatinización se define como el proceso transición mediante cual el almidón cambia de insoluble a una solución formada por sus componentes moleculares en forma individual mediante la aplicación de calor (Oosten; 1982), este proceso va acompañada de una serie de transformaciones o cambio irreversibles como la fusión de la parte cristalina (amilopectina), pérdida de birrefringencia, solubilidad del grano de almidón (Rodríguez; et al; 2001). La solución de almidón al ser calentada favorece con una absorción lenta de agua en las zonas intermicelares amorfas (amilosa) de los gránulos de almidón, a medida que se incrementa la temperatura a medida que se incrementa la temperatura el granulo retiene mayor cantidad de agua y este comienza a hincharse aumentando su volumen hasta que este llega al máximo, en ese momento pierde su propiedad de birrefringencia, si se administra más calor este al estar incapacitado para absorber agua se rompe parcialmente, finalmente la amilopectina y la amilosa fuertemente hidratadas son dispersada en la disolución, a mayor amilosa lixiviada mayor viscosidad (Seib., 1982., Jane., 1993). Los gránulos de almidón pequeños gelatinizan más rápido a menor temperatura. (Banks and Greengood., 1975)

En los rangos de temperatura en los que se realiza la nixtamalización tradicional el granulo de almidón experimenta cambios físicos y químicos los cuales son dependientes de la cantidad de agua presente, el tiempo de cocimiento, concentración de hidróxido de calcio y de las características de dureza del grano, estas transformaciones durante la gelatinización son irreversibles cambiando las propiedades de viscosidad, índice de absorción y solubilidad en agua (Rodríguez., 2002).

Durante la nixtamalización pequeñas cantidades de gránulos del almidón son gelatinizados, la mayor gelatinización ocurren durante el proceso de la molienda donde los gránulos hinchados se dispersan para formar una matriz la que actúa como un pegamento que une el resto de los componentes en la masa, una gelatinización excesiva con lleva a producir una masa pegajosa difícil de manejar, de manera contraria una escasa gelatinización provoca una masa sin cohesividad difícil de moldear (Bello., et al 2002)

La difusión del agua dentro del grano es lenta debido a la composición estructural del grano para lograr una humedad del 47% que es la requerida para formar un buena masa se requiere de tiempos muy largo de reposo, generalmente el tiempo para alcanzar la humedad de saturación oscila entre 4 y 5 horas aunque esto depende en gran medida de la dureza del grano (Arámbula Villa., et al 2001., Fernández et., al., 2003). Las bajas concentraciones de hidróxido de calcio o la ausencia de este disminuyen la difusión del agua hacia el interior del endospermo aun en las mismas condiciones de proceso (Martínez-Bustos et., al 2001)

#### **2.4.2 Retrogradación**

Este fenómeno se define como la insolubilización y precipitación principalmente de las moléculas de amilosa, de acuerdo a las características de sus cadenas la amilosa pueden orientarse paralelamente y interactuar entre si por medio de puentes de hidrogeno a través de sus múltiples hidroxilos perdiendo su capacidad de hidratación durante el enfriamiento de la suspensión formando una estructura semi organizada que trae consigo la formación de un gel rígido e irreversible ( Badui., 1999).

Este fenómeno se atribuía principalmente a la amilosa por la facilidad que este polímero tienen para formar una nueva estructura parcialmente organizada; sin embargo se encontró que la amilopectina ejerce cierta influencia sobre este fenómeno (Osman, 1975).

La figura 3 muestra los cambios que experimenta el almidón durante el proceso de cocimiento.

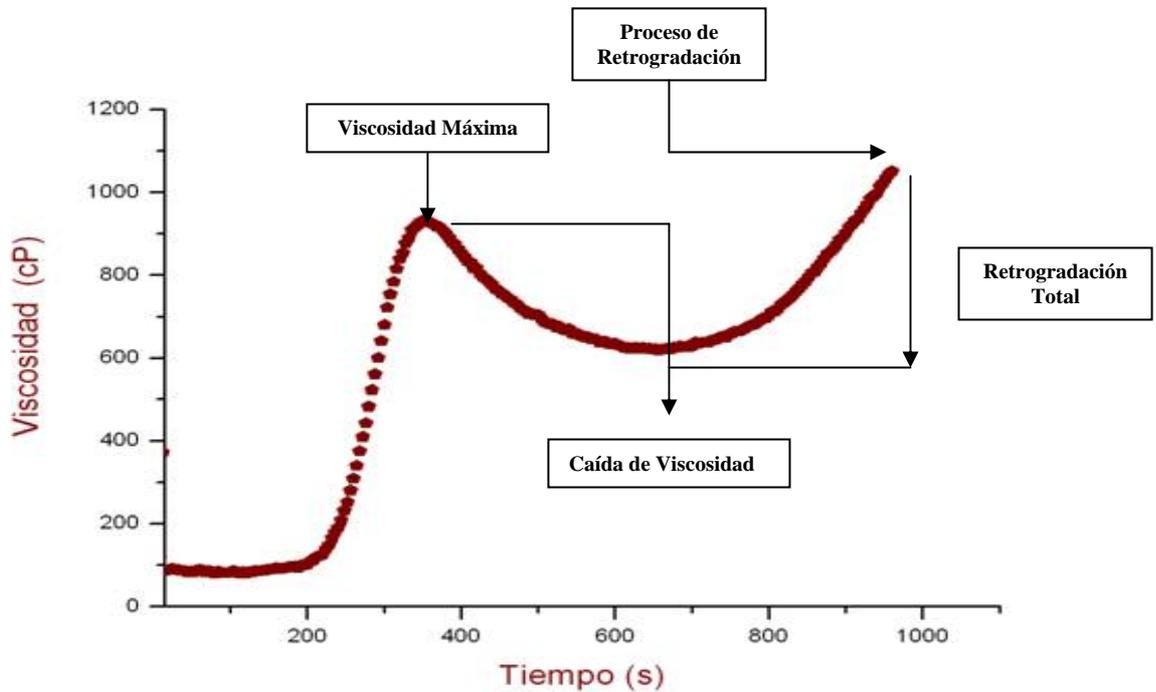


Figura 3 Amilograma de los principales cambios fisicoquímicos que experimente el almidón (Aguilera y Alvarado 2001)

### 2.4.3 Proteínas.

Las condiciones térmicoalcalinas en la que realiza la nixtamalización favorecen la desnaturalización de las proteínas principalmente de la glutenina haciendo más digestible, mejora la relación de leucina y isoleucina aminoácidos esenciales en la nutrición humana. Se favorece la hidrólisis de las cadenas polipépticas de las proteínas fraccionándolas a cadenas más cortas o aminoácidos libres haciéndolas más asimilables por el organismo.

Durante la nixtamalización se favorece la disponibilidad del triptofano que se encuentra presente en el grano de maíz transformándola en niacina vitamina relacionada con el control de la enfermedad de pelagra (Bressani et., al.,1958). Las proteínas tiene poca influencia sobre las propiedades fusiónales de las masas y/o tortillas generadas en la nixtamalización en comparación a almidón (Robles., 1986)

#### **2.4.4 Lípidos.**

El proceso de nixtamalización favorece la neutralización de los ácidos grasos libres formando sales de calcio. Los ácidos grasos son los responsables de la fijación de Ca en el grano de maíz durante el proceso de nixtamalización. Las especies alifáticas presentes en el grano de maíz son especies químicas fundamentalmente saponificables (Reguera et., al 2000., Valor., 2002)

### **2.5 Proceso industrial para obtención de harina de maíz nixtamalizado.**

#### **2.5.1 Antecedentes**

La harina es considerada desde el punto de vista fisicoquímico como una matriz compuesta principalmente por fracciones de endospermo, germen, pericarpio, etc., (Fernández 2002) siendo el almidón el principal componente el cual experimenta una serie de cambios durante el tratamiento térmico alcalino que le proporcionan las características finales a las tortillas.

El origen de las harinas nixtamalizadas data desde 1949 y actualmente suministra el 34% de las tortillas en el mercado mexicano. La industria de la tortilla se ubica en el quinto lugar en el mercado de los alimentos en México con una producción estimada de 11 millones de toneladas y 4 billones de dólares en ventas (Martínez-Bustos 1998). En México existen aproximadamente 51000 molinos de nixtamal y pequeñas de tortillerías, donde el 48 % corresponde a negocios que se dedican a la molienda de nixtamal, 28% a molienda y elaboración de tortillas y 24% elaboración de tortillas (INEGI 1998)

En México se manufacturan en promedio 3.0 millones de toneladas de harina nixtamalizada, de las cuales MASECA procesa aproximadamente 1.9 millones de toneladas de maíz., la producción a nivel industrial es una adaptación del proceso tradicional de nixtamalización (Descham, 1985., Serna., 2001).

El consumo de harinas nixtamalizadas se ha incrementado en los últimos años (consumo per cápita de 37 Kg de harina nixtamalizada o 58 kg. de tortillas al año elaboradas con este producto) debido a las múltiples ventajas que se tiene al emplear este producto como el emplear agua y una mezcladora para formar una masa que puede fácilmente transformarse en una gran variedad de productos (tortillas, botanas, tamales, etc..) requiriendo solo unos algunos minutos para su elaboración, a diferencia de emplear el grano como materia prima para la elaboración de producto, pues esto significa realizar el cocimiento del grano bajo condiciones térmico-alcálicas donde se requiere un mayor consumo de energía, mano de obra, tiempo de proceso y la generación de residuos contaminantes durante el proceso (nejayote o agua de cocimiento). El nejayote es considerado como uno de los efluentes más difíciles de tratar debido a su alto pH y demanda biológica o química de oxígeno. El empleo de harinas nixtamalizadas garantiza la reducción al mínimo la contaminación ambiental. (Flores et; al 2000; Serna; 2001)

### **2.5.2 Descripción del proceso industrial**

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de harinas nixtamalizada a nivel industrial.

El procedimiento consiste el seleccionar el maíz someterlo a un proceso de limpieza y determinación de humedad. Una vez acondicionado este es almacenado para su posterior proceso.

A nivel industrial la nixtamalización puede ser por lotes o en continuo consiste cocer los granos de maíz en aproximadamente 3 litros de agua acondicionada con 1% de  $\text{Ca(OH)}_2$  a temperaturas de 70 a 95°C durante 40-55 min. en estas condiciones el grano de maíz alcanza una humedad del 36% aproximadamente; el grano cocido es lavado mediante agua a presión hasta eliminar todo el excedente, posteriormente pasa por un proceso de molienda

hasta obtener una masa, la cual pasa por un secador y un molino hasta generar una harina de partícula fina.

La industria de la masa y la tortilla debe contar con la instalación necesaria para estas operaciones, se estima que las industrias grandes procesan entre 30–80 toneladas de harina diarias. Para aumentar la capacidad de producción estas empresas instalan varias unidades de producción paralelas. El rendimiento industrial de las harinas de maíz por cocción en cal fluctúa entre 86–95 % de acuerdo a la calidad del maíz. Los rendimientos industriales son mayores que los obtenidos en las zonas rurales y e las condiciones semi industriales atribuidos al empleo de gomas en el proceso (Jaime., 2003)

La vida de anaquel de las harinas nixtamalizadas por este proceso se estima entre 4 – 6 meses en invierno y de 3 meses en verano. Por lo general las harinas son puestas al público 15 días posteriores a su elaboración teniendo un periodo de anaquel de un mes (Del Valle, 1972).

El las ultimas décadas se han desarrollado una serie de tecnologías alternativas que buscan mejorar los procesos del cocimiento alcalino del grano de maíz; los resultados hasta el momento no son satisfactorios por lo que la industria de la masa y la tortilla no tienen más alternativa que el proceso de nixtamalización tradicional para la elaboración tanto de harinas como masa, materias primas esenciales para la elaboración de un sin número de productos.

A pesar de los avances generados en la investigación durante varias décadas la industria de la masa y la tortilla tiene la necesidad de seguir desarrollando alternativas que mejoren la eficiencia del consumo de agua y energía a fin de no tener problemas en la calidad del producto y el costo del producto final.

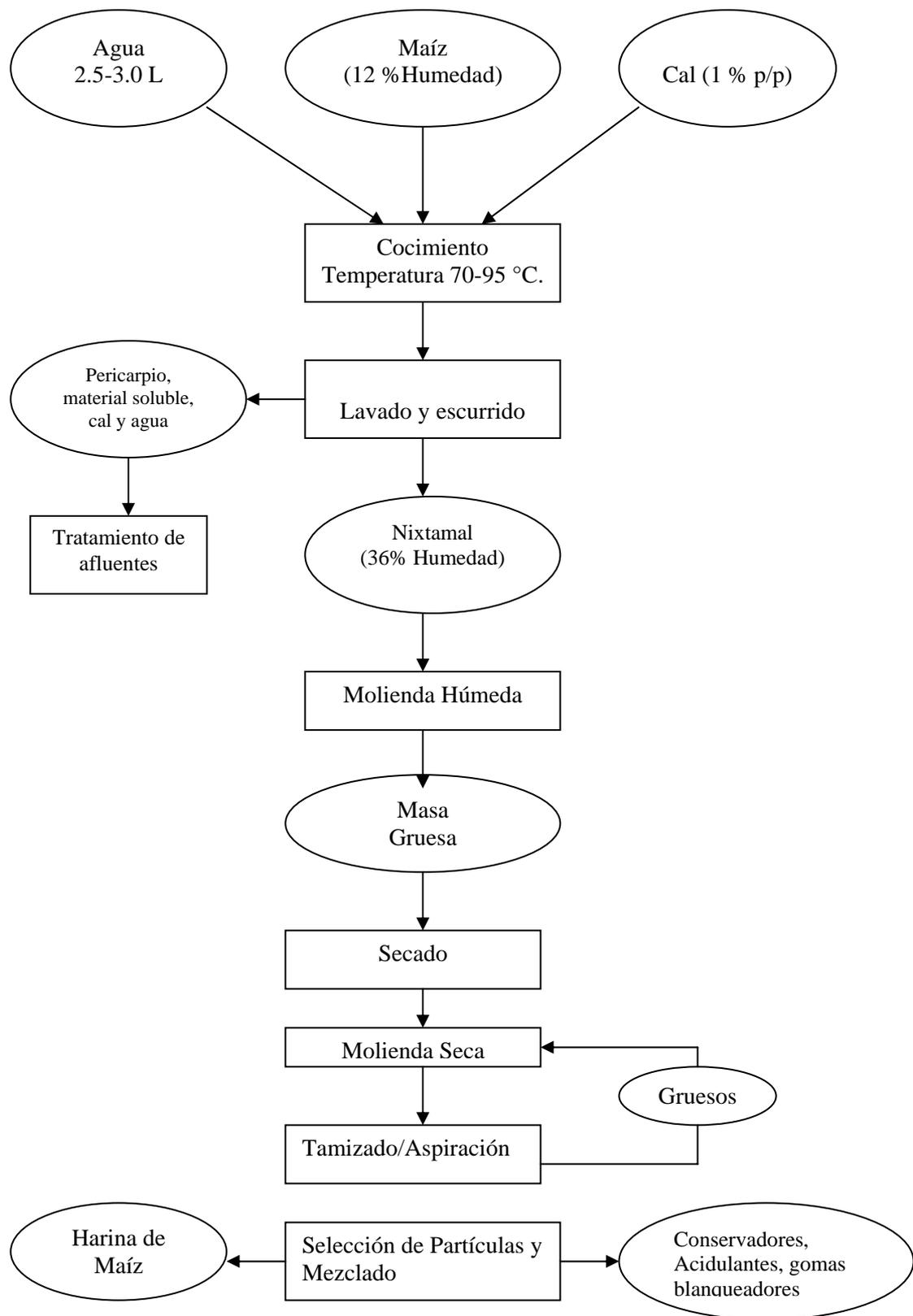


Figura 4 Diagrama de flujo del proceso industrial de producción de harinas nixtamalizadas  
Serna (2001)

## **2.6 Procesos alternativos en la nixtamalización del grano de maíz.**

### **2.6.1 Nixtamalización tradicional con vapor.**

Este proceso consta del mismo procedimiento que el tradicional solo que el cocimiento se realiza con vapor, la calidad de las tortillas es similar a las obtenidas por el proceso de nixtamalización tradicional (Bedolla Y Rooney, 1982; Serna Saldivar, 1996). Consiste en inyectar vapor a una mezcla de maíz cal agua y elevar la temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición, donde el maíz es cocido y posteriormente enfriado hasta una temperatura de 40 °C, finalmente los granos de maíz cocidos se dejan en reposo, se lavan y muelen como el proceso tradicional.

### **2.6.2 Nixtamalización con Pre- remojo**

La ventaja principal de este proceso es que se reduce en gran medida el tiempo de cocimiento del grano de maíz de 80 a 50 min (Morad et, al; 1986). Ahorrando el consumo de energía hasta 40 % en comparación con el método de nixtamalización tradicional, el tiempo empleado durante el pre-remojo es suficiente para que el grano absorba una gran cantidad de agua, la cual posteriormente facilita las reacciones fisicoquímicas durante el cocimiento térmico alcalino. Este proceso consiste en dejar reposar el grano de maíz en una solución de cal durante 12 hrs a temperatura ambiente, una vez concluido este tiempo se procede de la misma forma que en el proceso de nixtamalización tradicional.

### **2.6.3 Nixtamalización tradicional con cocción a presión.**

El grano cocido mediante la aplicación de altas presiones, fue estudiado como una posible alternativa para disminuir el tiempo empleado durante la nixtamalización tradicional., si embargo la altas presiones no favorecen todas las reacciones que se generan durante la nixtamalización pues el grano sufre

una degradación fuerte, modificando las características fisicoquímicas de la masa obtenidas bajo estas condiciones (Bedolla y Rooney, 1982).

La nixtamalización en este proceso se lleva cabo en un recipiente a presiones de 5–25 libras/pulgada<sup>2</sup> en un tiempo aproximado de 20 minutos, posteriormente el grano cocido se lava y enfría hasta 77 °C se deja en reposo por 60 minutos con agitaciones cada 10 min. Finalmente el grano es molido, la textura de la masa resultante por este método es muy pegajosa y difícil de moldear, por lo que este método no ha sido implementado por la industria.

#### **2.6.4 Procesos continuos y discontinuos (por lotes)**

Consiste en colocar una muestra de maíz, cal y agua en una banda en espiral en una atmósfera de vapor, de tal manera que el grano es cocido a medida que este es transportado (Montemayor y Rubio, 1983). Una vez cocido el grano este es lavado para remover parte del pericarpio y el exceso de cal secado y molido. Las tortillas elaboradas con las harinas presentan características fisicoquímicas, reológicas y sensoriales semejantes a las elaboradas por el proceso tradicional la única desventaja que ofrece este proceso es el alto consumo de energía.

#### **2.6.5 Método con cámara de vapor**

Este proceso emplea temperaturas en un rango de 80 –120 °C el cocimiento de la harina de maíz se realiza dentro de una cámara de vapor con ventilador en la parte inferior para homogenizar tanto el aire como la harina de maíz previamente acondicionada con cal, la temperatura es elevada gradualmente hasta alcanzar el punto de ebullición, posteriormente la harina se transfiere a una cámara de enfriamiento finalmente esta es molida (Mendoza, 1975).

### **2.6.6 Proceso de cocción en microondas, infrarroja (IR) o radio frecuencia**

Este proceso emplea energía calorífica generada localmente por la vibración molecular de los constituyentes químicos excitados. En este proceso se lleva a cabo una deshidratación excesiva, lo cual resulta en un cocimiento no característico debido a que las ondas con estas frecuencias penetran todo el interior de la muestra (Martínez – Bustos et, al. 1996).

El proceso consiste en colocar una mezcla de maíz, cal y agua en el horno de microondas, esta mezcla se enfría hasta 28 °C., posteriormente pasa por un proceso de lavado y molienda. La textura de la masa y tortillas elaboradas con estas harinas no mostraron característica fisicoquímicas, reológicas y sensoriales a las tradicionales.

### **2.6.7 Nixtamalización por cocción dieléctrica**

Este proceso inicia con una maceración del grano de maíz en una suspensión de agua y cal a esta mezcla se le aplica un tratamiento dieléctrico dentro de una celda nylamide y dos electrodos de Cu Ni conectados a una corriente directa donde el voltaje es aumentado hasta alcanzar 100 voltios, estas condiciones se mantuvieron hasta alcanzar una presión de 10 lb/pul<sup>2</sup> esta presión se mantuvo durante 10 minutos, posteriormente el maíz es molido y deshidratado en una estufa de circulación de aire caliente. La textura de las tortillas elaboradas por este proceso no cumple con las expectativas de calidad requeridas por el consumidor (Gaytan et, al., 1997).

### **2.6.8 Nixtamalización fraccionada o selectiva.**

Patente No 4594260 (1986) Vaqueiro y Reyes presentan un proceso para la obtención de harinas nixtamalizadas mediante la cual consiste en separación pericarpio del germen y endospermo del grano de maíz. En este proceso solo el pericarpio es sometido a un proceso de nixtamalización tradicional al cual se

le incorpora una fracción de germen y endospermo. El maíz es hidratado en agua a temperatura de ebullición durante 4 min en una proporción de 2:1 agua:grano, alcanzando una humedad del 23-25%, una vez acondicionado el grano es drenado, molido y cernido hasta lograr la separación de la cáscara del endospermo. El pericarpio es nixtamalizado a temperaturas de 85-121 °C por un tiempo de 10 a 30 min. y concentraciones de hidróxido de calcio entre 0.4-1.0% p/p, posteriormente se somete a uno o dos lavados con agua limpia se drena y se mezcla con la fracción del endospermo y germen a una temperatura de 70-75 °C por medio de vapor en un tiempo de 2 a 5 min., finalmente se pasa a un proceso de secado (60-80°C) y molido. Las propiedades reológicas de la masa no son apropiadas para la elaboración de tortillas

#### **2.6.9 Nixtamalización fraccionada del grano de maíz**

Este proceso consiste en nixtamalizar en forma separada las fracciones del grano de maíz (Endospermo y Punta Germen y Pericarpio) con el propósito de hacer eficiente el consumo de agua y energía. Las fracciones del grano de maíz fueron separadas por medio de un descascarador continuo (12.5%). Las fracciones endospermo y PGP (Punta Germen y pericarpio) se nixtamalarán en forma separada en un cocedor Z-Teledne con alimentación de vapor a temperaturas de 70 a 92 °C por tiempos de 1.2 a 12 min con concentraciones de hidróxido de calcio entre 0 y 0.3 aunque este proceso hace eficiente el consumo de agua y energía las tortillas elaboradas por este proceso presentaron una textura quebradiza por lo que solo pueden emplearse en la elaboración de productos que requieran esta textura (San Martín., et al 2003).

#### **2.7 El proceso de extrusión como una alternativa en la obtención de harinas nixtamalizadas.**

El proceso de extrusión se utiliza para manufacturar una gran variedad de alimentos como cereales, botanas, alimentos precocidos para bebés, alimentos instantáneos, harinas pregelatinizadas, proteínas texturizadas, dietas para

animales domésticos, y en los últimos años en la elaboración de harinas nixtamalizadas (Duran., 1979., Martínez et., al., 1996., Galicia., 2002)

Este proceso, esta considerado como un proceso limpio, y muy eficiente en términos de uso de energía, generalmente ahorra espacio, mano de obra, y la compra de otros equipos. Las funciones básicas de un extrusor son las de mezclar, formar, cortar la pasta de manera continua. En la extrusión termoplástica combinan el calor y esfuerzos mecánicos que propician la gelatinización y dextrinización de los gránulos de almidón, la desnaturalización de las proteínas y la inactivación de enzimas que afectan negativamente la vida de anaquel de los productos, la destrucción de compuestos antinutricionales (Martínez., 1993., Serna., 1996)

La extrusión térmico alcalina de harina de maíz como una alternativa en la elaboración de tortillas tiene su origen a finales de los setentas con Duran 1979; las condiciones en las cuales se desarrollo el estudio del proceso de nixtamalización por extrusión no permiten dar un resultado real de cuales son los factores que realmente están influenciando en el proceso, el estudio solo evalúa de manera cualitativa algunas características de las masas obtenidas en el proceso y no las del producto final como la tortilla.

Patentes 5,558,886 y 5,532,013 EUA realizadas por Martínez et al (1996). Patente de equipo y proceso de nixtamalización por extrusión respectivamente para la elaboración de masa de maíz que describe un método continuo y rápido, consiste en una molienda en seco del grano de maíz para reducir el tamaño de partícula, la harina de maíz crudo es acondicionada a una humedad del 25 a 60% con una concentración de hidróxido de calcio de 0.1 a 0.25%., la harina es extrudida en temperaturas de 60°C a 95°C donde el tiempo de residencia del material en el proceso de extrusión es de 1 a 2 min tiempo necesario para obtener una masa con buenas propiedades para elaborar tortillas.

El proceso cubierto en las patentes mencionadas, se emplea un extrusor de bajo cizallamiento con una camisa de calentamiento a través de resistencias eléctricas. La energía calorífica de las resistencias y la mecánica de extrusión son convertidas en mayores presiones internas y altas temperaturas en el cañón del extrusor, haciendo más eficiente y controlado el proceso. A través de este proceso se obtiene una buena calidad de masa, se reducen el tiempo de proceso de 18 horas en el tradicional a 1.5 minutos en promedio.

Proceso patentado por Irvin et., al (1991) con número de patente 4,985,269 extrusión continua para la producción de tortilla (chip); en la actualidad las botanas elaboradas a base de maíz se obtienen mediante harinas y/o masa obtenidas por el proceso de nixtamalización tradicional, el cual requiere cuando menos 12 hrs. de proceso. El proceso para la elaboración de masa y tortillas consiste en un procesamiento no-hidratado donde el grano de maíz es acondicionado directamente en el alimentador del extrusor hasta que el grano alcanza la forma de harina., estas se acondiciona directamente dentro del alimentador empleando la cantidad de agua necesaria para alcanzar una humedad entre 25 a 35% incluyendo la contenida en el grano a la cual se le adiciona una concentración de hidróxido de calcio de 0.5% y una pequeña cantidad de emulsificante de 2 a 3 % la temperatura de cocimiento empleada es de 230°F a 270°F con un tiempo de residencia de 175 a 400 segundos con un consumo de energía de 300 a 550 Watt/hora por kilogramo. La elaboración de botanas de maíz por este proceso ofrece las siguientes ventajas, reduce el tiempo de cocimiento del grano de maíz, hace eficiente el consumo del agua y de la energía; aunque este es un proceso que incluye la adición de cal durante el cocimiento este no genera efluentes contaminantes, las temperaturas empleadas durante el proceso garantizan la esterilización de los materiales y el no desarrollo de microorganismos. Se tiene un aumento en el contenido de fibra debido a que se puede emplear el maíz integral para la obtención de masa, el contenido de humedad de la masa es menor que el obtenido por el proceso tradicional (50 %) facilitando el freído de las tortillas; las ventajas del procesos son muchas sin embargo las características fisicoquímicas de las

masa son las requeridas para la elaboración de una botana, y no para una buena tortilla.

Estudios realizados por Galicia (2002), propone un proceso de extrusión del grano integral que consiste en moler el grano de maíz y acondicionarlo a diferentes porcentajes de humedad y concentraciones de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  antes de ser sometidos a un proceso de extrusión, empleando temperaturas de extrusión entre 88 –122 °C. El producto extrudido secado y después molido, obteniendo harinas nixtamalizadas con las que se elaboraron tortillas. Las tortillas obtenidas por este proceso presentaron buenas características fisicoquímicas, reológicas y sensoriales semejantes a las del proceso tradicional, pero el tiempo de almacenamiento de las harinas obtenidas por este proceso no superaron un mes, presentando índices de rancidez muy altos.

El proceso de nixtamalización por extrusión a diferencia del proceso de nixtamalización tradicional todos los componentes del grano de maíz (pericarpio, proteínas, lípidos y almidón) son retenidos en el proceso, estos posiblemente afecten la calidad de las harinas instantáneas. En el proceso de nixtamalización tradicional se pierde de 8.5 a 12.5 % (p/p) de sólidos totales en el nejayote, de los cuales 12.2-17.5 % (p/p) son lípidos (Arámbula., 2001).

De acuerdo con los resultados obtenidos por Galicia en el 2002 las harinas obtenidas por el proceso de nixtamalización por extrusión del maíz integral sufrieron cambios importantes durante su almacenamiento pues presentaron olor y sabor desagradable, posiblemente por que el proceso favoreció la liberación de ácidos grasos libres generados por la hidrólisis de algunos lípidos propiciando una reacción oxidativa de estos compuestos.

A pesar de que este proceso ofrece muchas ventajas en comparación al método tradicional, la operación del proceso requiere de un mayor estudio y conocimiento sobre los puntos críticos de control de forma de obtener una

harina y productos alternativos con mejores características de calidad y almacenamiento, objeto de la presente investigación.

### **III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En México el maíz representa la mitad del volumen total de alimentos, ocupa el 57% de la superficie destinada a granos básicos y oleaginosas, el 92% de los predios destinados a la producción de este cultivo son de autoconsumo, donde aproximadamente el 11% del grano comercializado proviene de predios con una superficie de 2 a 5 Has y el 29% de predios de 5 a 10 Has. (Cámara Nacional del Maíz Industrializado, 2003).

La demanda anual de maíz supera los 23,000 millones de toneladas, de las cuales más del 55 % son industrializadas en diversos productos dentro de los cuales la tortilla el producto de mayor importancia. La industria de la masa y la tortilla emplea la nixtamalización tradicional como única alternativa para la obtención de masa y/o harina nixtamalizada, aun cuando esta presente los siguientes problemas, altos consumos de energía por la baja eficiencia de la transferencia de calor al grano en el proceso de nixtamalización. Tiempo de proceso entre 14-16 horas, uso ineficiente del agua pues se utiliza en promedio 3 metros cúbicos de agua por cada tonelada de maíz procesado, generando 1.2 m<sup>3</sup> de aguas altamente contaminadas, las que por su composición son difíciles de recuperar causando un fuerte daño ambiental, disminución nutrimental del nixtamal importante en el contenido de fibra y proteínas solubles en condiciones térmico-alcálicas (gluteninas). A nivel industrial las condiciones de nixtamalización tradicional se modifican de manera importante a fin de hacer más eficiente el proceso y consumo de energía (reducción del tiempo de reposo, temperaturas de cocimiento), sin embargo estos cambios ocasionan la pérdida de las propiedades funcionales de las tortillas reduciendo su calidad y rendimiento. A fin de mejorar la calidad de la tortilla la industria emplea mejoradores de textura aditivos y gomas.

#### **IV. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El proceso de nixtamalización tradicional de maíz es hasta nuestros días el único proceso que emplea la industria para la elaboración tanto de masa como de harinas nixtamalizadas, si embargo este proceso presenta una serie de desventajas pues requiere de un largo tiempo de reposo, altos consumos de energía, el empleo de grandes volúmenes de agua que posteriormente se convierten en aguas altamente contaminantes las cuales causan un impacto ecológico importante y un alto costo de producción.

Hasta el momento las tecnologías alternativas de nixtamalización generadas hasta nuestros días no han alcanzado optimizar el proceso durante el cocimiento alcalino del grano de maíz, la calidad de la masa y/o tortilla no tienen las mismas características fisicoquímicas y reológicas que se generan durante el proceso de nixtamalización tradicional., por lo tanto se hace necesario el desarrollo de una tecnología que logre la optimización del tiempo durante el proceso, que garantice el consumo de agua y energía, disminuya la contaminación ambiental que actualmente se genera por el nejayote y finalmente que la calidad de la masa y/o tortilla sean aceptables tanto en sus características sensorialmente como de textura por el consumidor.

Aunque el proceso de cocimiento por extrusión ha sido empleado para elaborar masa las que presentan una calidad aceptable, no se ha logrado obtener una harinas con las características fisicoquímicas, reológicas y sensoriales suficientes para sustituir al proceso tradicional, pues las condiciones bajo las que se han desarrollado estas tecnologías generan un grano con alta gelatinización en el almidón teniendo como consecuencia que la textura de la masa sea muy adhesiva y difícil de moldear durante la elaboración de la tortilla (Martínez et al., 1996).

Las investigaciones realizadas sobre el empleo de la extrusión como un proceso alternativo para la obtención de masa hasta el momento se han llevado a cabo mediante el empleo del grano de maíz de forma integral, lo que significa que todos los componentes del grano permanecen dentro del sistema sin perder ningún componente del grano, lo que trae consigo una serie de contratiempo pues es cierto se incrementa la cantidad de fibra y el contenido de algunas proteínas. También es importante mencionar la conservación de todos los lípidos del grano pone en riesgo el tiempo de vida de la harina nixtamalizada pues la liberación de ácidos grasos durante el proceso cocimiento por extrusión propicia la rancidez del producto, demeritando su calidad por lo que se debe poner atención sobre este fenómeno de tal modo que se puedan producir harinas que técnicamente sean operables durante la comercialización, distribución y/o almacenamiento de las harinas nixtamalizadas, razón por la cual se proponen estudiar algunas variables como la mezclas de las diferentes porciones de los componentes del grano de maíz (Endospermo, Germen, pericarpio y punta, previa separación a través de un descascarador continuo) y las condiciones durante el proceso de extrusión afín de obtener una harina nixtamalizada con buenas características para la elaboración de tortillas.

## **V. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL.**

Estudiar el efecto de la nixtamalización de las fracciones del grano de maíz por el proceso de extrusión para obtener harinas instantáneas

### **5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

Estudiar los efectos de tiempo y temperatura en el proceso de descascarado del grano de maíz (Descascarador continuo CICATA-IPN).

Caracterizar el grano de maíz de acuerdo a su índice de acidez y dureza.

Estudiar el efecto del porcentaje de humedad, temperatura y la relación porcentual de endospermo y PGP (Punta, Germen Y Pericarpio) durante el proceso de la nixtamalización por extrusión de las fracciones del grano de maíz.

Estudiar las propiedades viscosidad, temperatura de fusión, índice de acidez, de Absorción y Solubilidad en agua en las harinas obtenidas en el proceso de nixtamalización de las fracciones del grano de maíz y compararlas con la harina nixtamalizada tradicionalmente.

Analizar las propiedades de textura (fuerza máxima de compresión y extensión), rolabilidad, inflado en las tortillas elaboradas por el proceso y compararlas con el proceso tradicional.

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### Etapas del desarrollo experimental

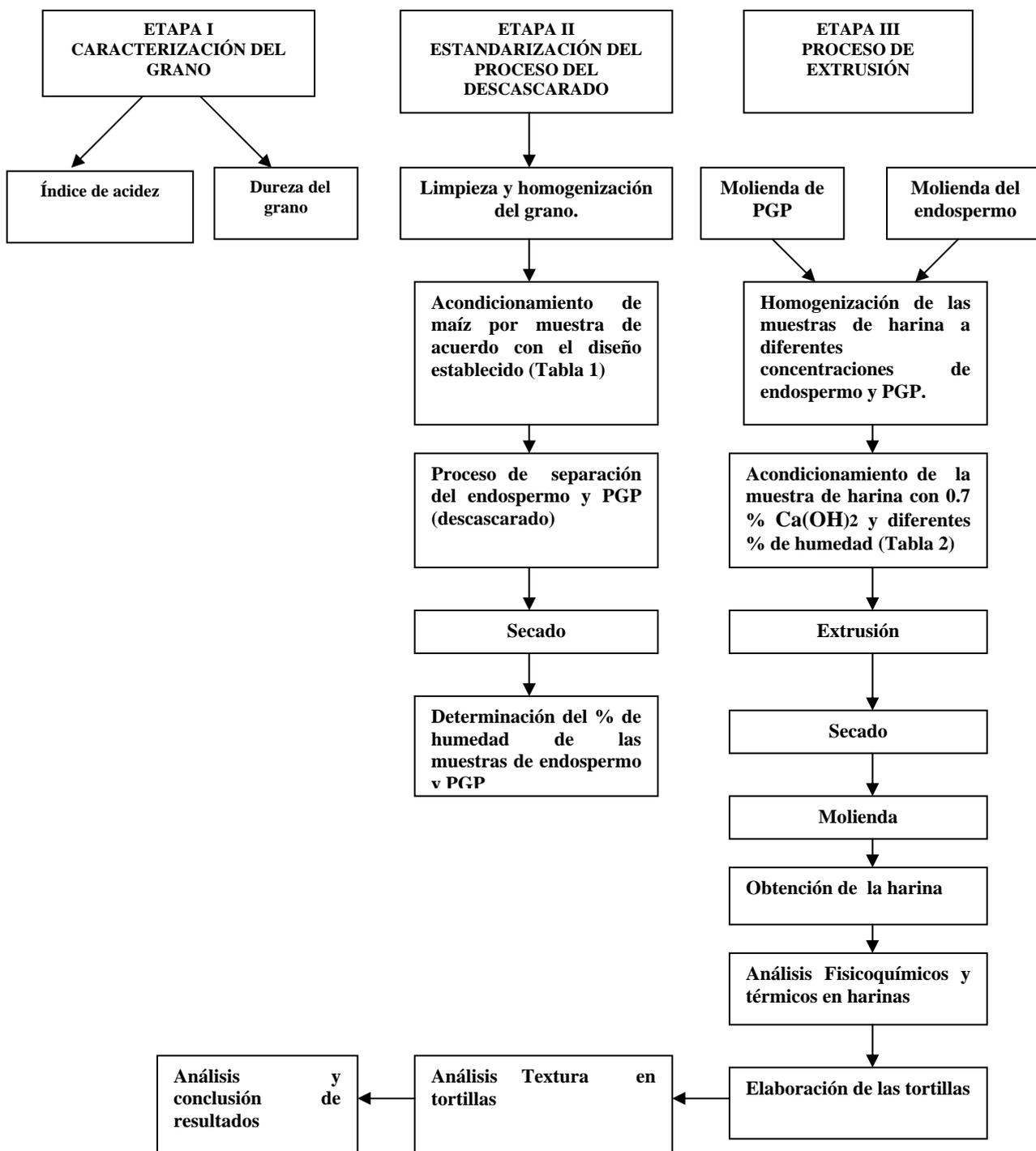


Figura 5 Etapas del desarrollo experimental del proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM para la obtención de harinas.

Para la elaboración de las harinas nixtamalizadas por este proceso se empleo como materia prima maíz criollo amarillo cultivado en los valles altos del Estado de Tlaxcala bajo un régimen de temporal en el ciclo primavera - verano del 2003.

## **6.1 Acondicionamiento del grano de maíz.**

Consistió en someter 200 Kg. de maíz a un proceso de limpieza el cual se realizo con un clasificador The J. Lt Day modelo 76063 USA, con una malla de abertura promedio de 7.502 mm, después se homogenizo en un mezclador de durante 10 min (“V” marca Fylles Tore Start, USA), finalmente el grano de maíz limpio fue almacenado para posteriormente ser procesado.

### **6.1.1 Caracterización del grano de maíz.**

Conocer la calidad de la materia prima (grano maíz) empleadas en el proceso nixtamalización por extrusión fue parte importante pues las características varían de acuerdo a la variedad, manejo durante su transportación almacenamiento por lo que se requiere conocer algunas características importantes como la dureza, porcentaje de humedad del grano de maíz, el nivel de deterioro que este a sufrido durante su transporte y almacenamiento (Salinas et., al 1992).

### **6.1.2 Determinación del Índice de Acidez y porcentaje de humedad del grano**

Consistió en tomar una muestra representativa del grano de maíz previamente homogenizado, limpio y someterlo a un proceso de molienda fina con un molino de cafe tipo 4041 modelo KSM-2 marca Braun. El índice de acidez se determino bajo el método oficial 02 –03 de AACC (1983) y el porcentaje de humedad del grano se realizo de acuerdo con el método oficial 44 –15 A de AACC (1983).

### **6.1.3 Dureza del grano de maíz.**

La dureza del grano de maíz se determinó mediante el Índice de flotación, método propuesto por Salinas (1992), se empleó una solución de  $\text{NaNO}_3$  ajustada a una densidad de 1.25 g/ml a una temperatura de 23 °C mediante el uso de un picnómetro, controlando la temperatura durante la prueba. Se tomó una muestra representativa de 100 granos de maíz, enteros, limpios y sanos; posteriormente se sumergieron en 600 ml. de la solución ajustada agitándolos durante un minuto, después de ese tiempo se realizó el conteo de los granos precipitados y los que permanecieron en flotación.

### **6.2 Proceso de descascarado del grano entero de maíz.**

El proceso de descascarado consistió en estudiar las condiciones de temperatura y tiempo de remojo óptimas para la separación del endospermo y PGP (Punta, Germen y Pericarpio) mediante un diseño experimental DCC (Diseño Central Compuesto Montgomery., 2003) **Tabla 1**. Se emplearon muestras de 3 kg. de grano de maíz limpio y homogenizado, las cuales fueron acondicionadas a diferentes temperaturas y tiempo de remojo (Tabla 1), una vez acondicionadas las muestras se eliminó el agua mediante un proceso de escurrido de 10 min. finalmente estas se sometieron a la separación mediante un descascarador continuo (Prototipo construido en CICATA-IPN) donde la separación se realiza mediante la abrasión del grano a la velocidad de rotación (800 rpm.) y el tiempo de residencia del grano fue constante para todas las muestras. La cantidad de agua empleada fue de 0.8 l /Kg. de maíz.

Las fracciones obtenidas de cada muestra se sometieron a un proceso de separación con un equipo neumático (turbina) adaptado en CICATA-IPN donde se separa por un lado el endospermo por otro y el PGP. Las fracciones en forma separadas se sometieron a un proceso de secado en una estufa de vacío F. J. Stokes Corp, Pensilvania EUA. a una temperatura de 60°C durante 12 hrs.

Para obtener un resultado significativo en el porcentaje de separación se determino el porcentaje (% b.s.) de humedad de las fracciones del grano (endospermo y PGP) para todas las muestra, el porcentaje de humedad se determino mediante el método oficial 44 –15 A de AACC (1983).

**Tabla 1 Diseño de experimentos empleado en el descascarado del grano de maíz.**

Variables		Niveles				
		-1.414	-1	0	+1	+1.414
<b>X1 = Temperatura (°C)</b>		26	28	33	38	40
<b>X2 = Tiempo (min.)</b>		5	7	12	17	19
Ensayo	Variables codificadas		Variables experimentales			
	X1	X2	X1	X2		
1	-1	-1	28	7		
2	-1	+1	28	7		
3	+1	-1	38	17		
4	+1	+1	38	17		
5	0	0	33	12		
6	0	0	33	12		
7	0	0	33	12		
8	0	0	33	12		
9	0	0	33	12		
10	+1.414	0	40	12		
11	-1.414	0	26	12		
12	0	+1.414	33	19		
13	0	-1.414	33	5		

### 6.2.1 Proceso de separación de las fracciones del grano de maíz (endospermo y PGP) para la elaboración de las harinas

El acondicionamiento del grano de maíz para la elaboración de las harinas consistió en primer lugar localizar las condiciones optimas en el proceso de descascarado. El punto máximo para la separación de las fracciones del grano de maíz fue establecido a un tiempo de remojo de 17 min. y una temperatura del agua de 40 °C., bajo estas condiciones se realizó la separación de todo el

maíz que fue empleado en la preparación de todas la muestra realizadas durante el proceso de nixtamalización por extrusión.

Posteriormente las fracciones en forma separada se sometieron a un proceso de secado en un secador de charolas al vacío F. J. Stockes Corp, Pensilvania EUA. a una temperatura de 60°C durante 12 hrs. Y finalmente a un proceso de molienda en un molino martillos modelo 2 HT martillos tipo estribo con malla de orificios circulares de 0.25 mm finalmente las fracciones previamente molidas se envasaron, etiquetaron y almacenaron a 5 °C.

### **6.3 Procesos de obtención de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las Fracciones de Grano de Maíz (FGM)**

#### **6.3.1 Acondicionamiento de las harinas para el proceso de extrusión de las FGM.**

El acondicionamiento de las muestras para proceso de extrusión consistió en determinar el contenido de humedad de las fracciones después del proceso de secado con la finalidad de ajustar el contenido de humedad establecido en el diseño de experimento, una vez determinada la cantidad de agua empleada se procedió a mezclar harina de endospermo y harina de PGP en las concentraciones establecidas en el diseño de experimento (Tabla 2) el mezclado se realizo en una mezcladora Kintchen modelo MK4588WH E.U.A a velocidad baja, a las muestras se les adicionó en forma gradual con un rociador una solución  $\text{Ca(OH)}_2$  una concentración constante para todas las muestras de 0.7%, el tamaño de las muestras fue de 3 kg.

**Tabla 2 Diseño de experimentos para el proceso de extrusión**

Variables	Niveles				
	-1.414	-1	0	+1	+1.414
<b>X<sub>1</sub> = Temperatura (°C)</b>	93	100	110	120	126.82
<b>X<sub>2</sub> = % de Humedad (P/P)</b>	26.59	30	35	40	43.41
<b>X<sub>3</sub> = % PGP (Punta, Germen y Pericarpio)</b>	0.0	3.69	7.569	12.069	15.138

Ensayo	Variables codificadas			Variables experimentales		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1	100	30	3.069
2	-1	-1	+1	100	30	12.069
3	-1	+1	-1	100	40	3.069
4	-1	+1	+1	100	40	12.069
5	+1	-1	-1	120	30	3.069
6	+1	-1	+1	120	30	12.069
7	+1	+1	-1	120	40	3.069
8	+1	+1	+1	120	40	12.069
9	-1.682	0	0	93	35	7.569
10	-1.682	0	0	93	35	7.569
11	+1.682	0	0	126	35	7.569
12	+1.682	0	0	126	35	7.569
13	0	-1.682	0	110	26.59	7.569
14	0	-1.682	0	110	26.59	7.569
15	0	+1.682	0	110	43.41	7.569
16	0	+1.682	0	110	43.41	7.569
17	0	0	-1.682	110	35	0
18	0	0	-1.682	110	35	0
19	0	0	+1.682	110	35	15.138
20	0	0	+1.682	110	35	15.138
21	0	0	0	110	35	7.569
22	0	0	0	110	35	7.569
23	0	0	0	110	35	7.569
24	0	0	0	110	35	7.569
25	0	0	0	110	35	7.569
26	0	0	0	110	35	7.569

### **6.3.2 Proceso de extrusión de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.**

El extrusor que se empleo para esta operación es uno de tornillo simple, de fabricación Nacional diseñado y construido por CICATA-IPN unidad Legaría, el cual consta de un alimentador en la parte inicial y superior de la camisa, la alimentación es a través de un tornillo alimentador vertical de velocidad variable para permitir el flujo constante de la harina al interior del extrusor, se fijo una velocidad del extrusor de ~50 rpm (15 Hz). La temperatura fue una de las variables en estudio por lo que esta fue controlada por medio de termopares localizados en las tres regiones del cañón del extrusor y conectadas a un registrador de temperatura, que para la primera zona se fijo en 55-65 °C y la segunda entre 20-30 °C por de bajo de la temperatura de la tercera zona la cual corresponde a la especificada en el diseño de experimentos.

En el proceso de extrusión el control de la temperatura es importante ya que este es un punto critico en los resultados de las harina extrudidas por lo que se realizo una calibración de una o una hora y media antes de someter el materia a proceso, el aumento de la temperatura provocada por la fricción mecánica fue controlada por medio de enfriamiento a través de la circulación de aire comprimido en cada una de las tres zonas de calentamiento.

Una vez alcanzadas las condiciones de operación se procedió a colocar la muestra previamente acondicionada al alimentador de donde se transporto por medio de un tornillo sin fin de 95 cm de longitud, 6cm de diámetro y una relación de compresión de 1:1 se empleo una velocidad de rotación del tornillo de ~50 rpm la cual permaneció constante para todas las muestra. La salida del materia extrudido fue regulada por una matriz circular de diámetro de ~  $\frac{3}{4}$ " donde el material se corto en trozos de 2-3 cm. de longitud para facilitar el proceso de secado.

### **6.3.3 Secado**

El material extrudido se sometió a un proceso de secado para el cual se empleo un secador de charolas al vacío F. J. Stokes Corp, Pensilvania EUA. a una temperatura de 60°C durante 12 hrs con el objetivo de disminuir la humedad.

#### **6.3.4 Molienda, envasado y almacenado de las muestras.**

Después del secado las muestras se sometieron a una molienda fina con un micro pulverizador modelo 2HT, con martillos tipo estribos y malla de orificios circulares de 0.25mm de abertura, finalmente la muestras se envasaron en bolsas de plástico previamente etiquetadas y se almacenaron a temperatura de 5°C.

### **6.4 Análisis de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM**

#### **6.4.1 Viscosidad.**

La determinación de la viscosidad se realizo mediante el uso de un viscosímetro Rapid Visco Analyser modelo RVA-4 (Newpotr Scientific PTY Ltd., Sydney Australia) se emplearon dos repeticiones por muestra donde el peso de estas fue de aproximadamente de 4g ajustando el % de humedad a 14 mediante las siguientes formulas.

$$S = \frac{86 * A}{100 - Hm} \qquad W = 25 + (A - Hm)$$

Donde:

A = al peso de la muestra analizada

Hm = la humedad de la muestra analizada

W = la cantidad de agua que se requiere para obtener 14% de humedad

El ajuste de humedad se realizó mediante el método No 14-15 de AACC. Una vez realizados los cálculos de la cantidad de harina y agua requeridos para el análisis, las muestras se pesaron en recipientes cilíndricos de aluminio previamente tarados, a las cuales se les adiciono mediante una pipeta volumétrica la cantidad necesaria de agua para alcanzar 14 % de humedad, finalmente se colocó un agitador de plástico.

En la determinación de la viscosidad se empleo el siguiente perfil de tiempo y temperatura, la homogenización de la muestra se realizó en un tiempo de 10 segundos a 960 rpm, el tiempo de calentamiento de la muestra de 50°C a 90°C fue de 5 minutos, posteriormente se mantuvo la temperatura constante a 90°C durante 5 minutos, finalmente la muestra se enfrió hasta alcanzar nuevamente los 50°C en un tiempo de 6 minutos. El tiempo total empleado el cada una de las muestra fue de 16 minutos, donde la velocidad de agitación permaneció constante a 160 rpm. Los resultados de la viscosidad de las muestra son graficados, en esta grafica se puede apreciar la viscosidad máxima a 90°C durante el ciclo de calentamiento y máxima a 50°C durante el ciclo de enfriado (retrogradación del almidón).

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

Este análisis se realizó por triplicado usando el método reportado por Anderson et al (1982), que permite cuantificar la cantidad de agua incorporada a la harina y el porcentaje de sólidos solubles disueltos en agua a una temperatura de 30°C.

El método consistió en colocar 2.5 gramos de muestra de harina en tubos de centrifuga previamente tarados, se adiciono 40 ml de agua destilada, posteriormente los tubos se colocan en baño maría con agitación durante 30 minutos a temperatura de 30°C, finalmente se colocaron en una centrifuga a una velocidad de 3000 rpm durante 10 minutos.

Para la determinación del Índice de Solubilidad en Agua se tomaron 10ml del sobrenadante de cada una de las muestras y se transfirieron a cápsulas previamente taradas, estas se colocaron en una estufa a 105°C hasta peso constante, el resto del sobrenadante se midió para obtener el volumen total del líquido. El ISA se determino mediante la siguiente ecuación:

$$ISA = \frac{A * (B/10)}{C} (100)$$

Donde:

A = sólidos disueltos en 10 ml del sobrenadante

B = ml totales del sobrenadante

C = peso de la muestra seca

Para la determinación del Índice de Absorción de Agua (IAA) se peso el tubo con la muestra de harina después de haber retirado todo el sobrenadante y por diferencia de pesos se obtuvo el valor de los gramos de agua absorbidos en la muestra de harina. El IAA se determino mediante la siguiente ecuación.

$$IAA = \frac{\text{Peso del sedimento}}{\text{Peso de la muestra}}$$

#### **6.4.3 Determinación del índice de acidez.**

El índice de acidez es un parámetro que puede emplearse para determinar la calidad del grano, un valor de 15 mg de KOH/100 g muestra seca se estima en un maíz recién cosechado y 35 mg de KOH/100 g muestra seca como limite de deterioro establecido en la compra venta de maíz, valores superiores indican un mayor deterioro en el grano, altas concentraciones de humedad favorecen la rancidez del grano ( Christensen and kaumann 1968).

Se determino mediante el método 02-03 AACC (1983). La preparación de la muestra para este análisis se realizo mediante el método 02-01 AACC (1983). El análisis de las muestras se realizó 6 mese posteriores a la extrusión y a 3 meses en la harina nixtamalizadas por el proceso tradicional.

Este es un método rápido para determinar el índice de acidez en maíz. Consiste en hacer pasar una muestra previamente molida de maíz en un tamiz con malla No 40, pesar 20 g. de harina y transferirla a un matraz erlenmeyer adicionar 50 ml de benceno grado reactivo, la mezcla se agita durante 30 min., transcurrido el tiempo el matraz se inclina para que la harina se deposite en el fondo durante 3min. Posteriormente el sobrenadante se filtra mediante un embudo büchner con filtro (papel Wattman No 2), durante el filtrado se cubre el embudo büchner con un vidrio de reloj o caja petri para disminuir la evaporación del solvente, se colectan 25 ml del filtrado y se transfieren a un matraz erlenmeyer de 125 ml, adiciona 25 ml de una solución de alcohol etílico- fenoltaleína al 0.04 %, finalmente la mezcla se titula con una solución de KOH al 0.0178 N hasta alcanzar el color estándar.

El blanco se preparo mediante el método oficial 02-01 AACC el cual consiste titular una solución preparada con 25 ml de una solución de alcohol etílico- fenoltaleína al 0.04 % y 25 ml de benceno con una solución de KOH al 0.0178 N. hasta que la mezcla alcanzo el color estándar.

La preparación del color estándar para las muestras y el blanco se realizó mediante el método oficial 02-01 AACC (1983), el cual consiste en colocar 50ml de agua en un matraz erlenmeyer y adicionar gota a gota una solución de dicromato de potasio al 0.05% hasta que el agua alcanza el tono de color del grano, adicionar 2.5 ml de una solución permanganato de potasio preparada al 0.01% y mezclar. Para el color estándar para la titulación del blanco a 50ml de agua de le adicionaron 2.5 ml de una solución preparada de permanganato de potasio al 0.01%.

La acidez se reporta como los mg. de KOH requeridos para neutralizar los ácidos grasos de 100 mg de materia seca basándose en la siguiente formula:

$$Acidez = \frac{(T - B) * 10}{100 - W} (100)$$

Donde:

T = ml de KOH requeridos para titular la muestra.

B = ml de KOH requeridos para titular el blanco.

W = g de agua en 100 g de muestra.

#### **6.4.4 Determinación de la transición de fase por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

En los rangos de temperatura en los que se realiza la nixtamalización el almidón experimenta ciertas transformaciones importantes (absorción de agua, aumento de viscosidad, solubilidad del grano, pérdida de birrefringencia etc.), las cuales son dependientes de la cantidad de agua presente, la temperatura y la razón del flujo de calor que se suministra durante el proceso., estas transformaciones influyen considerablemente sobre las características finales del producto (Rodríguez., et., al 2001).

El análisis de Calorimetría Diferencial de barrido se realizó mediante un equipo DSC (Differential Scanning Calorimeter) Pyris 1 PERKIN ELMER empleando un peso promedio de muestra de 11 mg de harina previamente acondicionada con una relación harina:agua de 2:1 respectivamente, alcanzando una aw ~ 0.97.

Las muestras se colocaron en capsulas de aluminio (KIT No 0219-0062 PERKIN-ELMER de 10 mm. de diámetro por 5 mm. de alto), se sellaron herméticamente para evitar la evaporación., posteriormente se colocaron en el equipo de DSC donde la velocidad de calentamiento se realizó a 5 °C/min obteniendo los termo gramas en un intervalo de temperatura de 40 °C a 150 °C.

Este análisis se realizó por triplicado empleando una cápsula vacía como patrón de referencia en cada una de las muestras.

## **6.5 Elaboración de tortillas con harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión de las (FGM) y tradicional.**

### **6.5.1 Determinación de la consistencia en masas comerciales.**

La consistencia de la masa es un factor importante en la elaboración de la tortilla, de acuerdo con Paredes-López y Saharopulos-Paredes (1983), los mejores resultados en la elaboración de la tortilla son obtenidos con una masa con contenidos de humedad de alrededor de 50%. Un contenido mayor de humedad ocasiona que la tortilla requiera mayor tiempo durante el cocimiento aumentando los costos de producción por el mayor consumo de combustible, de la manera contraria si la tortilla contiene menor cantidad de humedad esta podría quemarse durante el proceso de cocimiento disminuyendo la calidad final en esta.

Con el objetivo de que las condiciones de operación en la elaboración de la tortillas fueran homogéneas, se realizó un análisis preliminar de la consistencia de 5 masas comerciales (región de Tlaxcala) para obtener un valor de referencia en la elaboración de las masas obtenidas por el proceso de nixtamalización por extrusión, de las fracciones del grano de maíz y especificar si existe una diferencia en la capacidad de absorción de la harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión y las comerciales.

Las muestras se adquirieron de manera aleatoria, tomando las muestras en bolsa de polietileno para evitar la pérdida de humedad durante el manejo y transporte de las muestras.

El análisis de consistencia se realizó mediante el método propuesto por San Martín et al, (2003) el cual consiste en emplear un equipo Texture Analyser-

XT2i, una plataforma con un orificio de un centímetro de diámetro en la parte central colocada como base en el texturometro, una sonda cilíndrica P25/L Perspex con pistón de 2.5 cm. de diámetro y un cilindro de aluminio.

El procedimiento consistió en colocar una muestra de 35 g de masa en un cilindro de aluminio el cual se colocó de manera manual en la plataforma previamente centrada con respecto a la sonda cilíndrica, posteriormente se bajó de manera manual el pistón hasta que la sonda quedara en la parte superior del cilindro, pero sin tocar la muestra. La prueba consiste en hacer pasar la muestra de masa por un orificio 1 cm. de diámetro a una velocidad de 1.5 mm/s. Los valores de la fuerza de cizallamiento ejercida por la sonda sobre la masa fueron graficados por el equipo. Los resultados del análisis de consistencia de las muestras analizadas fueron en torno a 5000 gf. Por lo que se empleó como valor de referencia los 5000 gf  $\pm$  200 gf para la elaboración de las masas elaboradas a partir de las harinas obtenidas en el proceso de extrusión.

### **6.5.2 Acondicionamiento de la masa a partir de harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM**

Se pesaron 100 g de harina nixtamalizada por el proceso a los cuales se les agregó una relación 1:1 agua:harina, se mezclaron con una batidora Kintchen modelo MK4588WH E.U.A a velocidad baja e inmediatamente se determinó su consistencia para evitar la deshidratación de las muestras, en caso de que la fuerza fuera mayor se fue adicionando agua en forma gradual hasta obtener la consistencia 5000 gf deseada, determinando el volumen total de agua para cada muestra.

### **6.5.3 Elaboración de las tortillas.**

Se ajustó la consistencia de la masa (5000 gf) en cada una de las muestras y se procedió a la elaboración de las tortillas, la cual consistió en tomar 20 g de

masa y formar discos  $12.5 \pm 0.1$  cm de diámetro y de 1-2 mm de grosor usando una tortilladora manual (casa Herrera, México). Los discos se colocaron en un comal de metal acondicionado con una solución de cal, el que fue calentado hasta alcanzar una temperatura constante de  $280 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , el cocimiento de las tortillas consistió en dejar 15 segundos la primera cara, 30 segundos la otra y finalmente 30 segundos nuevamente la primera cara, posteriormente las tortillas se colocaron en bolsa de polietileno para su análisis posterior, en promedio se emplearon 200g de masa para elaborar tortillas suficientes para cada análisis realizado

## **6.6 Determinación del análisis de textura, rolabilidad e inflado en las tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión y tradicional.**

La textura puede considerarse como la manifestación de las propiedades reológicas de un alimento (Aguilera., 2001). La estabilidad en la flexibilidad de las tortillas es una de las características importantes en la calidad de las tortillas, el nivel de humedad y su mantenimiento de esta juegan un papel importante para conservar sus características de textura (Almeida, et., al 1996)

La resistencia a la compresión es uno de ensayos más comunes empleados para evaluar la textura de los alimentos, el cual consiste en comprimir un muestra de alimento hasta su deformación o ruptura, la primera información se puede obtener en forma de curva, donde el pico más alto es considerado como la fuerza máxima a la ruptura. Se considera que los alimentos duros registra una curva con un pico abrupto, mientras que un alimento blando la curva se registra con una ascendente continua hasta finalizar el ensayo (Aguilera et al, 2001)

### **6.6.1 Análisis de compresión en tortillas.**

Una de las características más importantes para evaluar la textura de las tortillas es la compresión, la cual consiste en comprimir la muestra hasta su rompimiento o deformación específica (San Martín et al, 2003).

Este análisis consistió en colocar una tortilla entre una base de dos anillos metálicos (de 10 cm de diámetro), la resistencia a la compresión se realizó mediante una esfera de acrílico de 2.5 cm de diámetro el perfil empleado para este análisis consistió en hacer descender la sonda 10 mm a una razón de 2 mm/s y penetrar hasta la ruptura de la tortilla, los resultados son graficados por el equipo registrando la fuerza (N) en función de la distancia recorrida por la sonda. En cada uno de los tratamientos se realizaron 5 repeticiones incluyendo las tortillas elaboradas con masas comerciales con el propósito de disminuir el error experimental en los resultados de la compresión de la muestra.

#### **6.6.2 Análisis de extensión en tortilla.**

Este análisis se realizó mediante un Texture Analyzer (XT2i) empleando una sonda de extensibilidad Kieffer, para esta prueba se requirió una muestra rectangular de 6 cm de largo y 3 cm de ancho de la parte central de la tortilla, para lo cual se empleó un molde, a fin de establecer un control en el tamaño de la muestra.

Para el análisis de este parámetro se empleó un total de 5 repeticiones por muestra tanto de los ensayos como de las tortillas elaboradas con masas comerciales, reportando el promedio en cada muestra. La evaluación del comportamiento del perfil de textura en las gráficas de fuerza de compresión y extensión se evaluó cualitativamente mediante la relación fuerza distancia.

**Donde:**

**$h_1$  = Fuerza a la ruptura**

**$d_2$  = Cohesividad**

**$h_1/d_2$  = Rigidez**

**$h_2/d_2 - d_1$  = elasticidad**

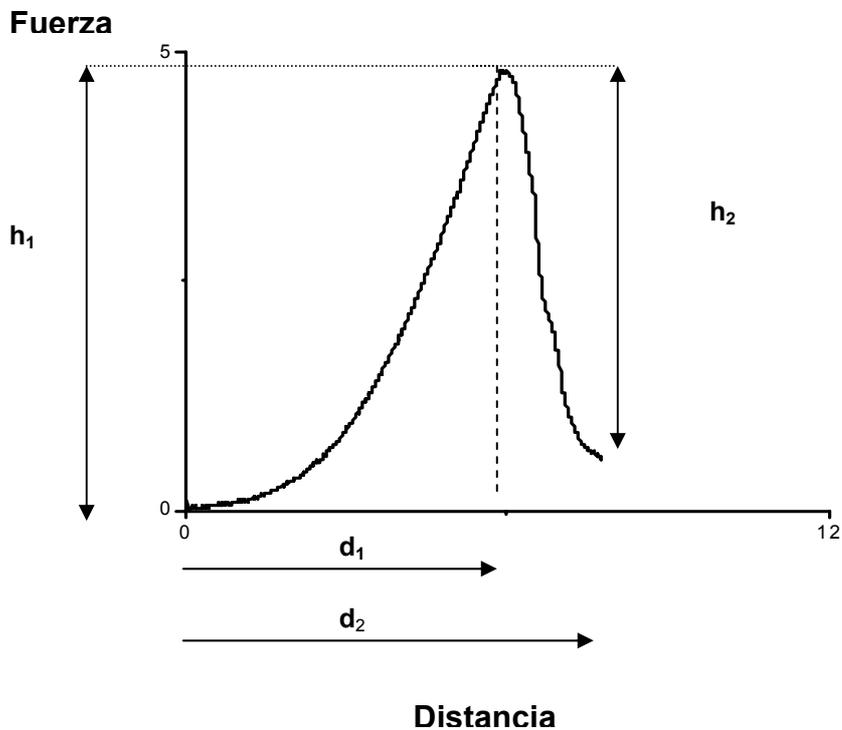


Figura 6 curva fuerza-distancia obtenidas en ensayos de resistencia a la penetración Aguilera (1997).

### 6.6.3 Determinación de rolabilidad.

La determinación de este parámetro se realiza de manera subjetiva por lo que el resultado durante una evaluación cambia de persona a persona y generalmente consisten en utilizar una metodología simple pero que refleja las características cualitativas en la tortilla (Suhendro et., al., 1998)

La determinación de este parámetro se realizó mediante la siguiente metodología., se elaboraron 10 tortillas bajo las condiciones establecidas anteriormente para este proceso, una vez cocidas estas se depositaron en un canasto envueltas en una servilleta de tela hasta que alcanzaron una temperatura  $\sim 30^{\circ}\text{C}$ , finalmente se enrollaron en forma individual cada una de las tortillas en una varilla con un diámetro de 1 cm. empleando una escala

subjetiva de valores del 1 al 5 donde 1 corresponde a aquellas tortillas que se enrollan completamente sin quebrarse, 2 para aquellas que se quiebran ligeramente en los extremos, 3 para aquellas tortillas que se quiebran en los extremos y en la parte central, 4 para aquellas tortillas que se quiebran en varios puntos y finalmente 5 para aquellas que se quiebran completamente.

#### **6.6.4 Inflado**

Esta característica se determinó durante el cocimiento de la tortilla empleando una metodología subjetiva asignando valores del 1 al 5 donde 1 significa que la superficie de la tortilla infla en un 100 %, 2, la superficie infla 75%, 3 infla un 50%, 4 infla 25 % y 5 para aquellas que no inflan.

#### **6.7 Diseño de experimentos y análisis estadístico.**

El análisis de resultados se realizó mediante el método de superficie de respuesta (MSR) a través de sistema de análisis estadístico SAS versión 6.12 TS020. La metodología de superficie de respuesta es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado de problemas en los que la respuesta de interés recibe influencia de varias variables con el objetivo de optimizar la respuesta (Montgomery., 2003)

Los diseños seleccionados para esta investigación corresponden a un Diseño Central Compuesto rotatable  $2^k + \alpha + nc$ , el cual consiste en una parte factorial donde  $2^k$  permite estimar el efecto que tiene una variable independiente sobre otros factores a diferentes niveles, generando conclusiones con validez sobre las condiciones experimentales,  $\alpha$  denominados puntos axiales los cuales permiten que el diseño sea rotatable y  $nc$  número de puntos centrales los cuales permiten el estudio de las variables en un nivel medio establecido por  $2^k$ .

En el proceso de descascarado se empleó un diseño central compuesto el cual consistió en  $2^2 + 4$  puntos axiales + 5 puntos centrales, donde el número de

puntos axiales de determino mediante  $\alpha = (n_f)^{1/4}$  donde  $n_f$  es el número de puntos en la porción factorial del diseño.

En el proceso de extrusión se empleo un diseño experimental de  $2^3 + 6$  puntos axiales + 6 puntos centrales, donde el número de puntos axiales de determino mediante  $\alpha = (n_f)^{1/4}$  donde  $n_f$  es el número de puntos en la porción factorial del diseño. Para reducir el error experimental se realizo dos replicas en los puntos centrales y axiales en el diseño.

### 6.7.1 Modelo de predicción para el diseño empleado en el proceso de separación de las fracciones del grano de maíz (descascarado).

$$Y = \beta_o + \sum_i^n \beta_i X_i + \sum_i \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Donde:

- Y = Función de respuesta**
- X<sub>1</sub> = Temperatura de remojo**
- X<sub>2</sub> = Tiempo de remojo**
- ε = Error experimental**

### 6.7.2 Modelo de predicción para el diseño empleado en la nixtamalización por extrusión de las FGM.

$$Y = \beta_o + \sum_i^k \beta_i X_i + \sum_i^k \beta_{ij} X_i^2 + \sum_{i \leq j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Donde:

- X<sub>1</sub> = Temperatura °C**
- X<sub>2</sub> = % de Humedad (p/p)**
- X<sub>3</sub> = % de endospermo y PGP (Punta, Germen Y Pericarpio)**
- ε = Error experimental**

## VII. RESULTADOS.

### 7.1 Resultado del proceso de descascarado del grano de maíz.

*Tabla 3 Resultados obtenidos durante el proceso de descascarado del grano de maíz.*

Variables dependientes			Variables independientes	
Ensayo	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Endospermo (% p/p b.s.)	PGP (% p/p b.s.)
1	28	7	93.0955	6.9045
2	28	17	89.9427	10.0573
3	38	7	88.598	11.4020
4	38	17	85.9029	14.0971
5	33	12	91.2852	8.7148
6	33	12	89.3584	10.6416
7	33	12	90.0268	9.9732
8	33	12	88.8549	11.1451
9	33	12	91.632	8.3680
10	40	12	88.4136	11.5864
11	26	12	86.3495	13.6505
12	33	19	91.5933	8.4067
13	33	5	92.3402	7.6598

*X<sub>1</sub> = Temperatura °C, X<sub>2</sub> = Tiempo min.*

Los resultados obtenidos de las fracciones de cada una de las muestras indicados en la Tabla 3 representan el valor promedio de los porcentajes de cada una de las fracciones endospermo y PGP (Pericarpio Germen y Punta) después de someterlas a un proceso de secado hasta peso constante. Las condiciones remojo que presentaron mayor porcentaje de separación (~15 %) fueron de 17 min y 38°C empleadas en la muestra 4 y las que menor porcentaje de separación obtuvieron fueron las que presentaron las muestra 1 y 13 (Tabla3) posiblemente los tiempos cortos de remojo influyen directamente en la separación debido a la baja difusión del agua hacia el interior del grano.

### 7.1.1 Análisis de varianza de los resultados del proceso de descascarado

Tabla 4 se muestran los resultados del análisis de varianza del descascarado del grano de maíz

**Tabla 4 Análisis de varianza del proceso de descascarado del grano de maíz**

Fuente de variación	G.L	S.C	C.M	Valor de F	P>F
Modelo	4	33.29295286	8.32323822	2.70	10.085
Temperatura	1	14.92066107	14.92066107	4.83	0.0516
Tiempo	1	6.53309235	6.53309235	2.12	0.1839
Temperatura*Temperatura	1	16.12876777	16.12876777	5.22	0.0516
Tiempo*Tiempo	1	4.54317454	4.54317354	1.47	0.2597

**Coefficiente de variación = 17.21357**

**Coefficiente de correlación R<sup>2</sup> = 0.757674**

El análisis de varianza indica que la temperatura afectan significativamente ( $p \sim 0.05$ ) el proceso de descascarado del grano de maíz, sin embargo no se encontró un efecto significativo para el tiempo y tiempo al cuadrado, sobre la separación del grano aunque el modelo de regresión presenta una correlación aceptable para predecir el comportamiento de estos dos factores durante el proceso de la separación del endospermo y PGP (Pericarpio, Germen y Punta).

#### **Modelo previsto por el diseño**

$$Y = 65.4236 - 3.9320X_1 + 0.96115X_2 + 0.06176X_1^2 - 0.032794X_2^2$$

**Donde:**

**X<sub>1</sub> = temperatura °C**

**X<sub>2</sub> = Tiempo Min.**

**Y = % Descascarado.**

### 7.1.2 Análisis de Superficie de respuesta del proceso de separación de PGP.

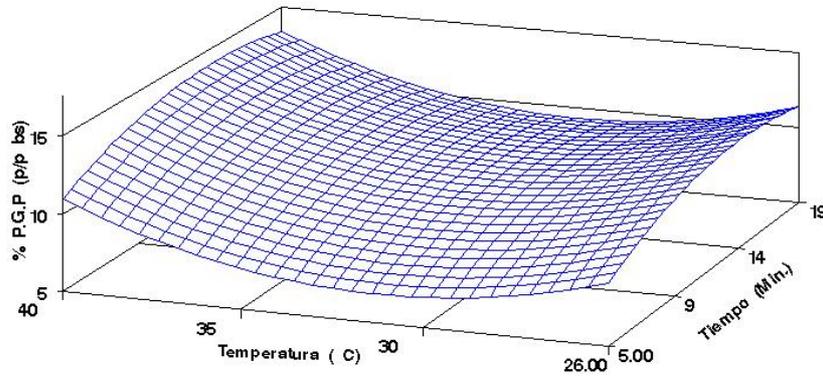


Figura 7 superficie de respuesta del proceso de descascarado del grano de maíz

El análisis de los datos (Figura 7) en la grafica de superficie de respuesta muestran que el porcentaje de separación es afectado principalmente por la temperatura del agua durante el remojo, aunque el tiempo influye de manera decisiva cuando se emplean temperaturas mayores a los 35 °C obteniendo una respuesta favorable en el proceso de separación, sin embargo cuando se emplea temperatura altas y tiempo de remojo mayor a 19 min se observa una disminución en la separación de los componentes, probablemente la cantidad de agua absorbida por el grano no facilita el trabajo mecánico durante la separación. El punto máximo presentado en la grafica muestra las condiciones optimas para el proceso de descascarado a 40°C y 17 min durante el remojo valores cercanos a los obtenidos experimentalmente.

### 7.2 Resultados experimentales, análisis de varianza y modelos de regresión obtenidos de las variables respuesta analizadas en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM

## 7.2.1 Resultados experimentales de las variables respuestas

En la tabla 5 se presentan los resultados de las propiedades fisicoquímicas de las harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión de las FGM

**Tabla 5 Promedios de los resultados experimentales de las variables respuesta obtenidas de las muestras de harina nixtamalizadas por extrusión de las FGM**

Ensayo	Variables Experimentales			Variables Respuesta					
	X1	X2	X3	Viscosidad máxima a 90°C (cP)	Viscosidad máxima a 50°C (cP)	IAA	ISA	Temperatura de fusión (°C)	Índice de acidez ml KOH
1	100	30	3.069	789	955	3.155	4.25	121	14.35
2	100	30	12.069	457	576	3.058	6.27	155	15.00
3	100	40	3.069	769	919	3.311	3.36	126	12.59
4	100	40	12.069	856	997.5	3.178	3.48	135	17.59
5	120	30	3.069	733	909	3.252	3.39	128	10.95
6	120	30	12.069	597	704	3.485	4.71	134	12.01
7	120	40	3.069	1373	1466	3.974	3.25	141	9.89
8	120	40	12.069	916	1044.5	4.992	4.91	166	12.73
9	93	35	7.569	697	974	2.768	5.25	156	16.97
10	93	35	7.569	787	1008	2.776	4.97	155	17.85
11	126	35	7.569	997	1106	3.567	3.26	157	14.61
12	126	35	7.569	969.5	1117.5	3.609	3.67	157	12.67
13	110	26.59	7.569	1126.5	1122	3.779	3.81	144	9.42
14	110	26.59	7.569	1018	1037	3.641	3.83	150	9.47
15	110	43.41	7.569	657	789	3.164	4.70	155	12.73
16	110	43.41	7.569	638	753	3.519	3.38	152	12.60
17	110	35	0	784	1050	3.104	4.17	148	16.14
18	110	35	0	1006	1362	3.032	3.21	152	16.65
19	110	35	15.138	563	721	3.177	3.67	156	15.65
20	110	35	15.138	640	819	3.124	4.14	152	16.83
21	110	35	7.569	879	1075	3.105	2.81	158	14.73
22	110	35	7.569	1038	851.5	2.883	3.49	154	14.78
23	110	35	7.569	1007.5	1255.5	2.949	3.44	156	16.54
24	110	35	7.569	849	1045.5	3.069	3.27	156	14.81
25	110	35	7.569	970	1217.5	3.303	3.81	155	15.08
26	110	35	7.569	972.5	1189	3.221	3.83	157	16.43

**X<sub>1</sub> = Temperatura °C, X<sub>2</sub> = % Humedad, X<sub>3</sub> = % PGP**

**IAA = Índice de Absorción de Agua, ISA = índice de Solubilidad en Agua**

## 7.2.2 Análisis de varianza y modelos de regresión de las variables respuestas evaluadas en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM

Los resultados experimentales (Tabla 5) fueron analizados estadísticamente, obteniendo el análisis de varianza para el modelo ajustado así como de los términos empleados en el ajuste del modelo para cada respuesta.

**Tabla 6 Análisis de varianza obtenidos de las variables respuesta en las harinas NEFGM**

Fuente de variación	Viscosidad máxima a 90°C	Viscosidad máxima a 50 °C	IAA	ISA	Temperatura de fusión	Índice de acidez
<b>Lineal</b>	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
<b>X<sub>1</sub></b>	0.0509*	0.1732	0.0007**	0.0258*	0.3917	0.0002**
<b>X<sub>2</sub></b>	0.9078NS	0.7520	0.3738	0.3044	0.2407	0.0596
<b>X<sub>3</sub></b>	0.0298*	0.0055**	0.3617	0.0454	0.0507*	0.1254
<b>Cuadrático</b>						
<b>X<sub>11</sub></b>	0.8605NS	NI	0.8273	0.0678	0.8952	0.3203
<b>X<sub>22</sub></b>	0.7936NS	0.1500	0.0124*	0.2549	0.1208	0.0001**
<b>X<sub>33</sub></b>	0.7936NS	0.2085	0.4730	0.2733	0.1000	0.5856
<b>Interacción</b>						
<b>X<sub>12</sub></b>	0.2592NS	0.3112	0.0433*	0.0476*	0.0379*	0.7484
<b>X<sub>13</sub></b>	NI	NI	0.1156	NI	NI	0.6328
<b>X<sub>23</sub></b>	NI	NI	0.4124	0.3817	NI	0.1073

\* = significativo a  $p < 0.05$  y  $p < 0.01$  \*\* = Altamente significativo a  $p < 0.001$  NS= No Significativo NI= No Influye en el modelo de regresión X<sub>1</sub> = Temperatura °C X<sub>2</sub> = % Humedad X<sub>3</sub> = % PGP

En la Tabla 7 se presentan los coeficientes de los modelos de regresión de las variables independiente, cuadráticos e interacciones que se ajustaron a los datos experimentales, obteniendo los coeficientes de regresión del modelo y la probabilidad de F en la que nos indica si el modelo este ajustado, para las diferentes respuestas de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM. La inferencia estadística esta indicada para cada respuesta cuando es discutida.

**Tabla 7. Modelos de regresión obtenido del análisis de varianza de las variables respuestas en harinas NEFGM**

<b>Coefficiente</b>	Viscosidad máxima a 90°C	Viscosidad máxima a 50 °C	IAA	ISA	Temperatura de fusión	Índice de acidez
<b>B<sub>0</sub></b>	52.153229784	2400.09152	41.41987815	90.6936148	202,0799412	-79.2523353
<b>Lineal</b>						
<b>B<sub>1</sub></b>	28.92592168	-39.197519	-0.33705832	-1.0739180	-0.2421941	0.28211154
<b>B<sub>2</sub></b>	-66.58900884	33.039719	-1.10737916	-1.5438535	-3.9499311	4.96259702
<b>B<sub>3</sub></b>	33.55309367	1.616008	-0.62052510	0.2597301	3.6686854	-0.66734105
<b>Cuadrático</b>						
<b>B<sub>11</sub></b>	-0.032546443	NI	0.0007490	0.0032414	-0.0220570	-0.00127644
<b>B<sub>22</sub></b>	-1.34073902	-2.447156	0.0078844	0.0079148	-0.1733426	-0.06830552
<b>B<sub>33</sub></b>	-3.603636618	-1.925871	0.0024638	0.0074499	-17603840	0.00752980
<b>Interacción</b>						
<b>B<sub>12</sub></b>	1.45000000	1.280000	0.0048825	0.0093275	0.150000	-0.00292500
<b>B<sub>13</sub></b>	NI	NI	0.0041138	NI	NI	-0.00486111
<b>B<sub>23</sub></b>	NI	NI	0.0041611	-0.0087166	NI	0.03405556
<b>R</b>	0.6717	0.6811	0.8313	0.7623	0.6998	0.9131
<b>C.V</b>	20.71	17.35	9.49	15.67	6.37	8.94
<b>P&gt;F</b>	0.09	0.0432	0.0079	0.0290	0.0579	0.0001

C.V=Coeficiente de Variación r= Coeficiente de correlación NI= No Influye en el modelo de regresión X<sub>1</sub> = Temperatura °C X<sub>2</sub> = % Humedad X<sub>3</sub> = % PGP

**Modelo de regresión empleado para las variables respuestas obtenidas en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM**

$$Y = \beta_o + \sum_i^k \beta_i X_i + \sum_i^k \beta_{ij} X_i^2 + \sum_{i \leq j} \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

La ecuación anterior se empleo para estimar los modelos de regresión ajustada a los resultados experimentales de cada una de las variables respuestas

Las graficas de superficies de respuestas se elaboraron a partir de los modelos de regresión ajustados y determinados por el análisis de varianza de cada una de las variables respuestas.

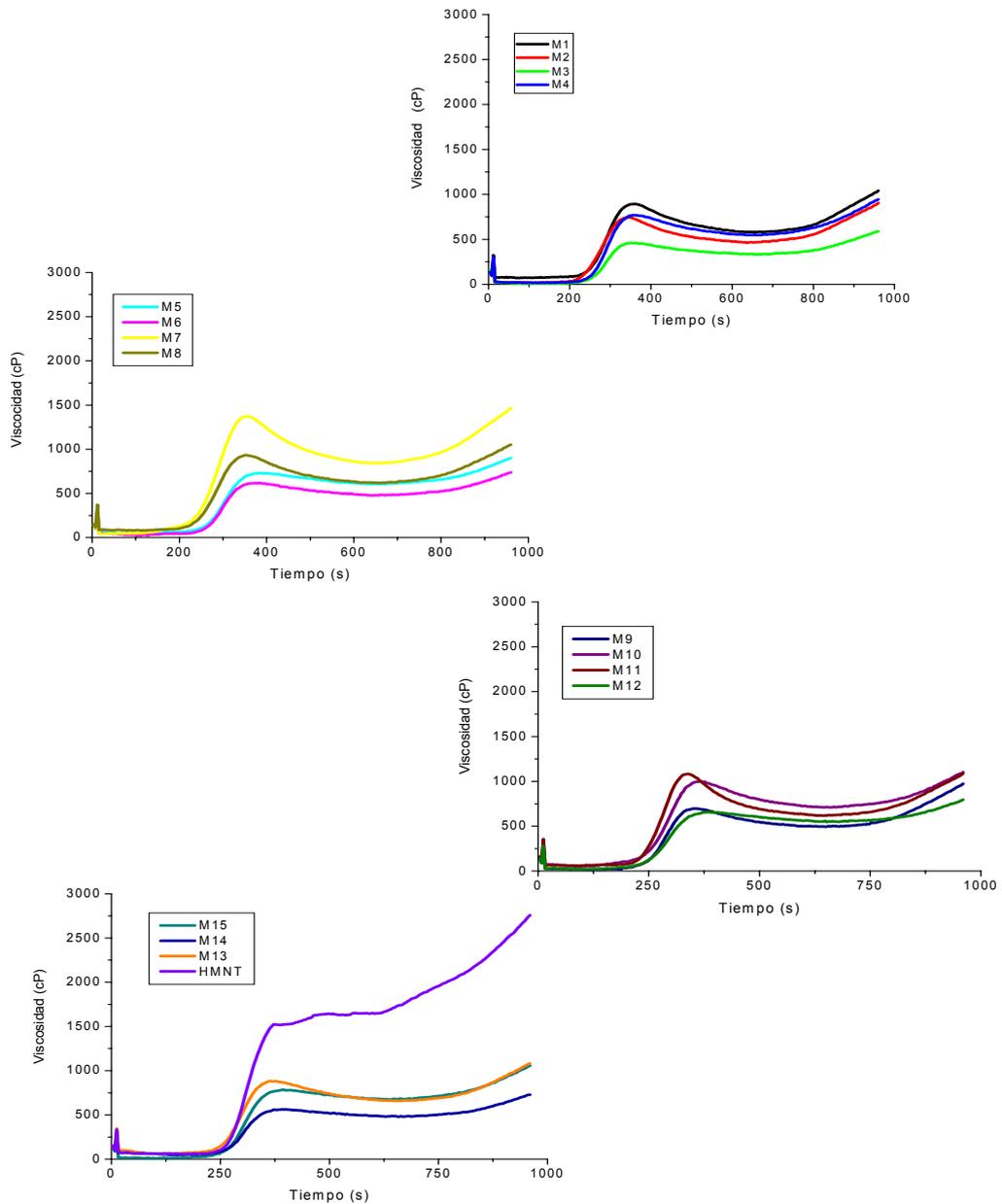
### **7.2.3 Análisis de resultados de las variables respuestas obtenidas a partir de la evaluación de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.**

#### **7.2.3.1 Viscosidad**

En la figura 8 son presentados los gráficos de viscosidad para los perfiles de temperaturas en que fueron evaluadas todas las muestras de harina nixtamalizada por extrusión. Se presentan los perfiles de viscosidad de solo de 15 muestras extrudidas bajo las condiciones establecidas en el diseño (8 muestras de los puntos factoriales+6 promedios de los punto factoriales +1 promedio de las muestras centrales + el promedio de 3 muestras obtenidas del proceso tradicional).

La muestra de harina nixtamalizadas por el proceso tradicional registro la mayor viscosidad a 90°C y a 50°C (figura 8) con respecto al resto de las muestras nixtamalizadas por extrusión, sin presentar una caída de viscosidad durante el calentamiento a temperatura constante (90°C) alcanzado valores importantes de retrogradación durante la etapa de enfriamiento (viscosidad máxima 50°C) probablemente se debe a que la mayor parte del almidón no sufre una fragmentación severa durante la nixtamalización tradicional, razón por la que este registra un incremento en la viscosidad durante el análisis. Las muestras nixtamalizadas por el proceso de extrusión, presentaron valores de viscosidad menores que las del proceso tradicional observándose una caída en la viscosidad durante el calentamiento a temperatura constante y aumentando de manera ligera durante la etapa de enfriamiento posiblemente las condiciones de extrusión en las que se llevo a cabo la nixtamalización favorecieron una mayor fragmentación de los gránulos de almidón. En general las muestras nixtamalizadas por el proceso de extrusión registraron valores de viscosidad máxima a 50°C menores al del proceso tradicional lo que significa que estas presentan un menor retrogradación o mayor grado de reordenamiento de las fracciones principalmente del almidón. Sin embargo la muestra 7 registro valor de máxima viscosidad a 90 °C cercano al del proceso tradicional 1373cP, Aunque la viscosidad registrada a 50°C durante el

enfriamiento alcanzó valores por debajo de los registrados por el proceso tradicional, esta muestra presento un valor más alto de viscosidad (1466 cP) en comparación al resto de las muestras.

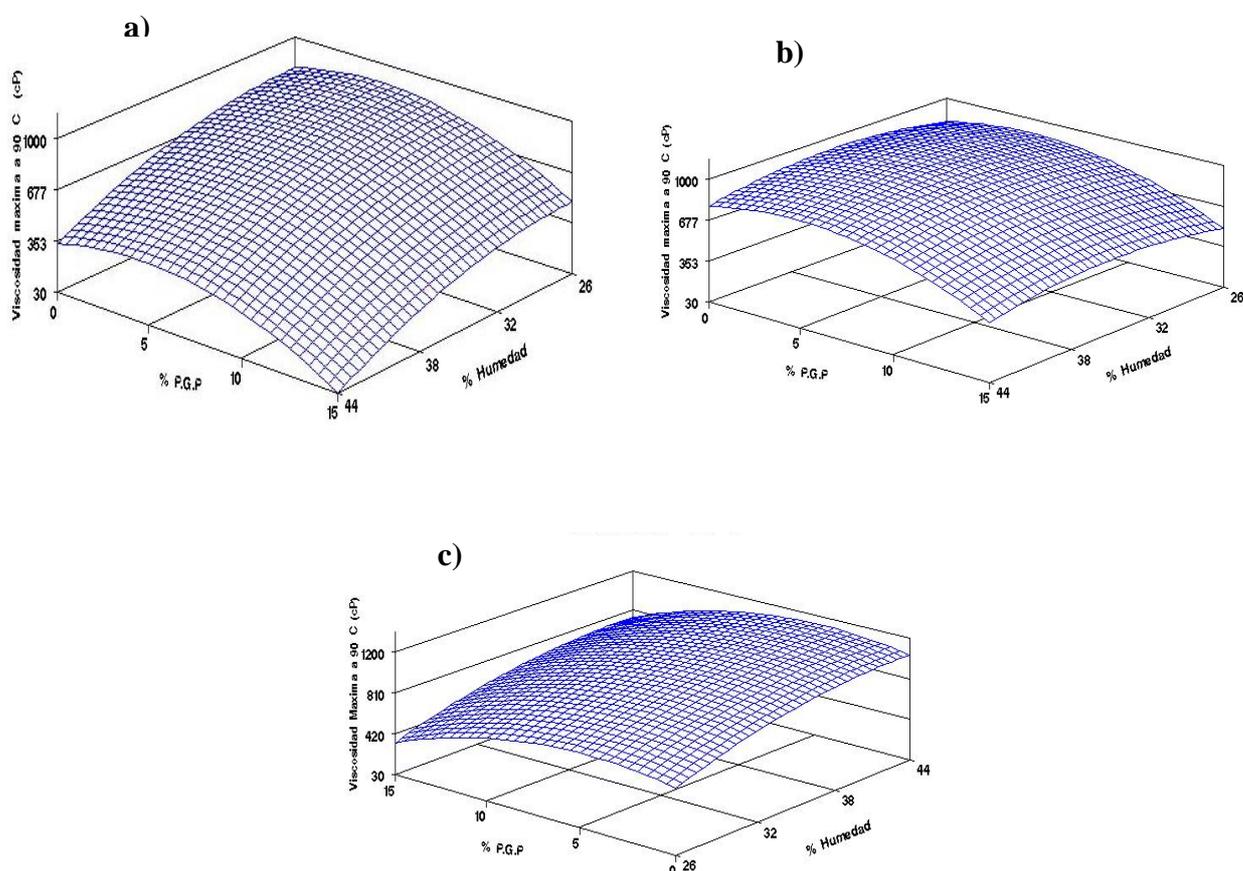


**Figura 8** Viscoamulogramas de harinas nixtamalizadas elaboradas por el proceso NEFGM M1-M15 y por el proceso tradicional HMNT.

### 7.2.3.2 Viscosidad máxima a 90°C: Análisis de varianza y superficie de respuesta

De acuerdo con los resultados en el análisis de varianza la temperatura y la concentración de PGP durante la nixtamalización por extrusión afectaron significativamente ( $p < 0.05$ ) la viscosidad máxima de las harinas a 90°C, así mismo los resultados obtenidos indicaron que no existe un efecto significativo del resto de los términos del modelo ni del efecto cuadrático e interacciones entre estas pues se obtuvieron  $p > 0.05$ .

En la tabla 7 se muestra el modelo de regresión empleado para viscosidad máxima a 90°C, el cual tiene un ajuste moderado a los datos experimentales, pues obtuvo una  $p > 0.05$ , un Coeficiente de Variación 20.71 y una Correlación de 0.6717, por lo que se debe tomar con cautela para la predicción de esta variable.



**Figura 9** Grafica de Superficies de respuesta de la viscosidad máxima a 90°C en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C., b) 110 °C y c) 126 °C.

En la superficie de respuesta de la figura 9a se observa que a medida que se incrementa la concentración de PGP y la concentración de humedad la

viscosidad máxima a 90°C decrece considerablemente hasta alcanzar valores muy bajos. Las temperaturas bajas de extrusión (93°) favorecen la fragmentación principalmente de los componentes de PGP que en su mayoría esta formado de pericarpio el cual tiene concentraciones altas de hemicelulosa y celulosa, siendo este ultimo compuesto de difícil hidrólisis de acuerdo a su estructura química en comparación a la estructura del almidón . Sin embargo las harinas elaboradas con bajas concentraciones de PGP y bajos porcentajes de humedades propiciaron el aumento importante en los valores de viscosidad a 90°C, este aumento se debe probablemente a que estas condiciones no favorecen la fragmentación del componente mayoritario (almidón) de la harina o existe un daño poco significativo durante el proceso. El aumento de la viscosidad en una harina refleja la capacidad que tiene el almidón para absorber agua durante la etapa de calentamiento (Hoseney 1991).

En las graficas de superficies de respuesta 9b y 9c se observa como la temperatura de extrusión de 110 °C y 126 °C favorecieron el aumento de viscosidad de las harinas en comparación a las extrudidas a 93 °C. Este aumento se debe principalmente a la poca fragmentación que sufre el almidón a temperaturas de extrusión altas, sobre todo en las harinas con alto porcentaje de humedad 38-44% y concentraciones de 0 -10% de PGP, en estas condiciones el porcentaje de humedad afecta directamente los cambios fisicoquímicos del almidón durante la nixtamalización por extrusión. Los bajos porcentajes de humedad y temperatura alta (126°C) favorecen la gelatinización y dextrinización del almidón durante el proceso de extrusión manifestando menores valores de viscosidad. En la medida que se incrementa el porcentaje de humedad se atenúa la dextrinización favoreciendo mayores valores de viscosidad a 90°C. Porque el agua en el proceso de extrusión actúa como plastificante evitando la fragmentación del almidón a esta temperatura. Este proceso favorece una mayor fragmentación en los componentes del grano en comparación al proceso tradicional. Khan et., al 1982; Arámbula-Villa et al., 2001 mencionan que un almidón que ha sido gelatinizado y deshidratado no

desarrolla una alta viscosidad a diferencia de un almidón nativo que desarrolla una mayor viscosidad.

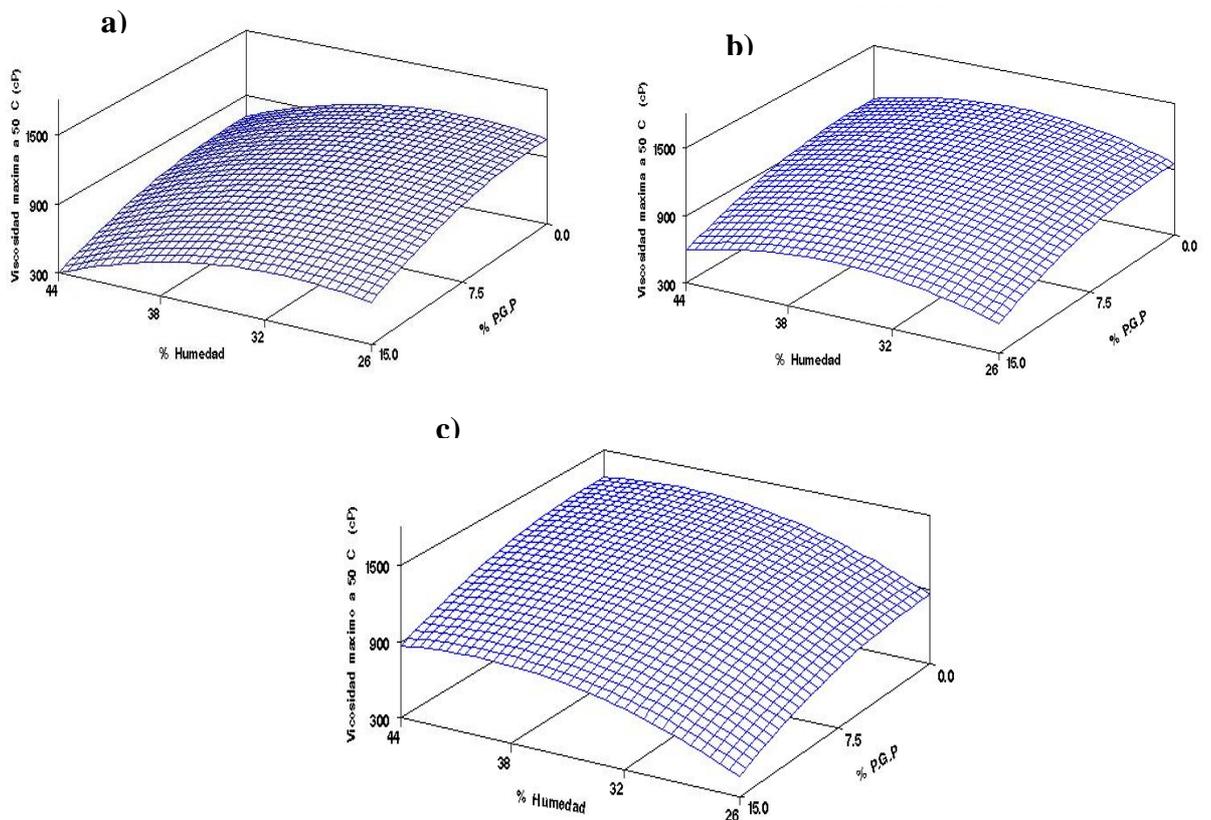
### **7.2.3.3 Viscosidad a 50°C: Análisis de varianza y superficie de respuesta**

La viscosidad máxima 50 °C es considerada importante, pues de los valores de esta dependen las características texturales de las tortillas durante el enfriado y almacenamiento.

La viscosidad a 50°C esta definida como el valor máximo de retrogradación del almidón. Este fenómeno predice el comportamiento en el reordenamiento molecular de los componentes del almidón, principalmente la amilosa.

De acuerdo con los resultados en el análisis de varianza (Tabla 6) la concentración de PGP durante la nixtamalización por extrusión afecta significativamente ( $p < 0.05$ ) la viscosidad máxima de las harinas a 50°C, no existe un efecto significativo del resto de los términos del modelo ajustado, ni del cuadrático e interacciones entre estas pues se obtuvieron  $p > 0.05$ .

En la tabla 7 se muestra el modelo de regresión empleado para viscosidad máxima a 50°C, el cual es confiable para realizar una predicción una vez que tiene una  $p < 0.05$ , un Coeficiente de Variación 17.35 y Correlación de 0.6811.



**Figura 10 Graficas de superficie de respuesta de la viscosidad máxima a 50°C en harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93°C, b) 110°C, c) 126°C**

De acuerdo a los resultados obtenidos en la grafica de superficie de respuesta de la figura 10a el valor máximo de viscosidad (~1200 cP) corresponde a aquellas harinas con bajas concentraciones de humedad y PGP (26 y 0% respectivamente), a temperatura de extrusión de 93°C, en estas condiciones probablemente los gránulos de almidón no son fragmentados o sufrieron una fragmentación parcial lo que dificulta el reacomodo de las moléculas de amilosa y amilopectina o que propicia una mayor retrogradación. Los valores mínimos de viscosidad 50°C, se obtuvieron en las harinas acondicionadas con altas concentraciones de humedad y altas de PGP, estas condiciones favorecen probablemente a una fragmentación de los componentes de PGP más severa que los gránulos de almidón por lo que su viscosidad también es menor, debido probablemente al efecto de cizalla generado durante el proceso.

En la figura 10b se observa un ligero cambio en el comportamiento de los valores de viscosidad cuando la extrusión se llevo a cabo a una temperatura más alta (110 °C), estas condiciones favorecieron una disminución de los valores de viscosidad en las harinas acondicionadas con bajo porcentajes de humedad y PGP, cuando comparadas con las extrudidas a 93°C.

Altas concentraciones de humedad favorecen de manera importante el aumento de la viscosidad 50°C aun cuando la temperatura de extrusión sea alta (126°C), para bajos contenidos de PGP (figura 10c). Las condiciones de temperatura no influyeron de manera importante en la modificación de la viscosidad a 50°C, sobre todo en aquellas harinas acondicionadas con altas concentraciones de humedad y bajas concentraciones de PGP. La razón se debe principalmente al efecto de la humedad la cual durante el proceso de extrusión absorbe cierto porcentaje de la energía transferida, por lo que los demás componentes de la harina recibirían menor energía preservándolos de una mayor fragmentación. De manera contraria las concentraciones bajas de humedad propician una disminución de la viscosidad 50°C, aun cuando las concentraciones de PGP sean bajas. Cuando la cantidad de agua es limitada, no ocurre una gelatinización completa en la temperatura usual para la nixtamalización, sin embargo conforme se incrementa la temperatura las regiones cristalinas del almidón pueden fundirse (Slade et., al 1991).

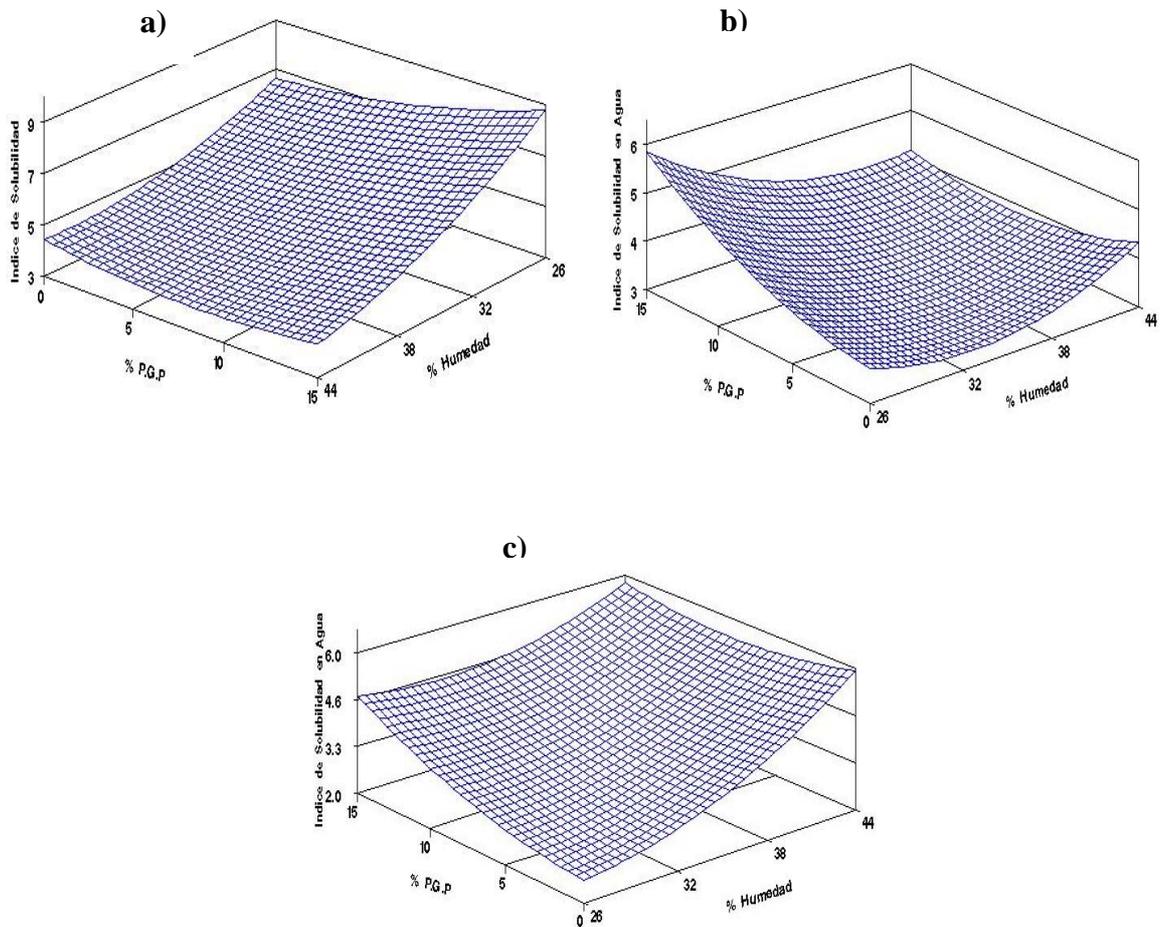
#### **7.2.3.4 Índice de Solubilidad en Agua (ISA): Análisis de varianza y superficie de respuesta**

El índice de solubilidad en agua es una de las características que indica el grado de fragmentación que presentan las harinas durante el cocimiento, expresado en sólidos solubles en agua (Bedolla et al., 1884, Bressani, 2001)

De acuerdo con los resultados en el análisis de varianza (Tabla 6) la temperatura de nixtamalización afecta significativamente ( $p < 0.05$ ) el Índice de Solubilidad en Agua (ISA), los resultados obtenidos en el ANOVA indicaron que

no existe un efecto significativo del resto de las variables repuesta ni del cuadrático e interacciones entre estas, obteniéndose una  $p > 0.05$ .

En el Tabla 7 se muestra el modelo de regresión empleado para ISA, el cual obtuvo una  $p < 0.05$ , Coeficiente de Variación 15.67 y una buena Correlación de 0.7623. El modelo es confiable para realizar la predicción sobre los valores del ISA



**Figura 11 Graficas de superficies de respuesta del índice de solubilidad en agua en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a diferente temperatura a) 93°C, b) 110 °C y c) 126 °C.**

En la grafica de superficie de respuesta de la figura 11a se observa que el índice de solubilidad en agua aumenta conforme disminuye la concentración de

humedad hasta alcanzar valores cercanos a 9 g/100g de sólidos solubles en agua. Concentraciones bajas de humedad favorecen la formación de compuestos solubles en agua durante la nixtamalización por extrusión en harinas con alta concentración de PGP y temperaturas bajas durante la extrusión (93°C).

En la Figura 11b el índice de solubilidad es favorecido en concentraciones altas de PGP y bajas concentraciones de humedad, esta temperatura propicia una mayor fragmentación de las fracciones de PGP y del almidón a compuestos más solubles en agua.

En la figura 11c se muestra el comportamiento del índice de solubilidad de las harinas extrudidas a una temperatura de 126 °C. En la grafica de superficie de respuesta se observa que las concentraciones altas de humedad favorecen de manera similar el incremento del índice de solubilidad en agua tanto en las harinas con altas y bajas concentraciones de PGP, sin embargo la extrusión con bajas concentraciones de PGP y de humedad desfavorecen la formación de compuestos sólidos solubles en agua cuando la extrusión se lleva a cabo en temperaturas altas (126 °C). Cuando la extrusión se lleva a cabo a 110°C El proceso de extrusión por nixtamalización afecta la propiedad de solubilidad en función de la temperatura, humedad de tratamiento y concentración del PGP. Bajas temperaturas y altas humedades disminuyen los valores de ISA, sin embargo cuando la temperatura se incrementa a 126°C y se procesa a alta humedad se observa un incremento substancial de la solubilidad, este efecto se debe probablemente a que la temperatura promueva una mayor fragmentación de los gránulos de almidón tornándola mas solubles en agua. El efecto de PGP solo se observa para humedades menores a 35%. Así también se observa que la solubilidad alcanza los mayores valores a bajas temperaturas (93°C) y disminuye para temperatura de 126°C, este efecto se puede explicar debido a que en el proceso de extrusión el efecto de cizalla en los materiales es mayor a 93°C, provocando mayor disrupción granular por lo que incrementa la solubilidad, y a 126°C los materiales alcanzan la transición

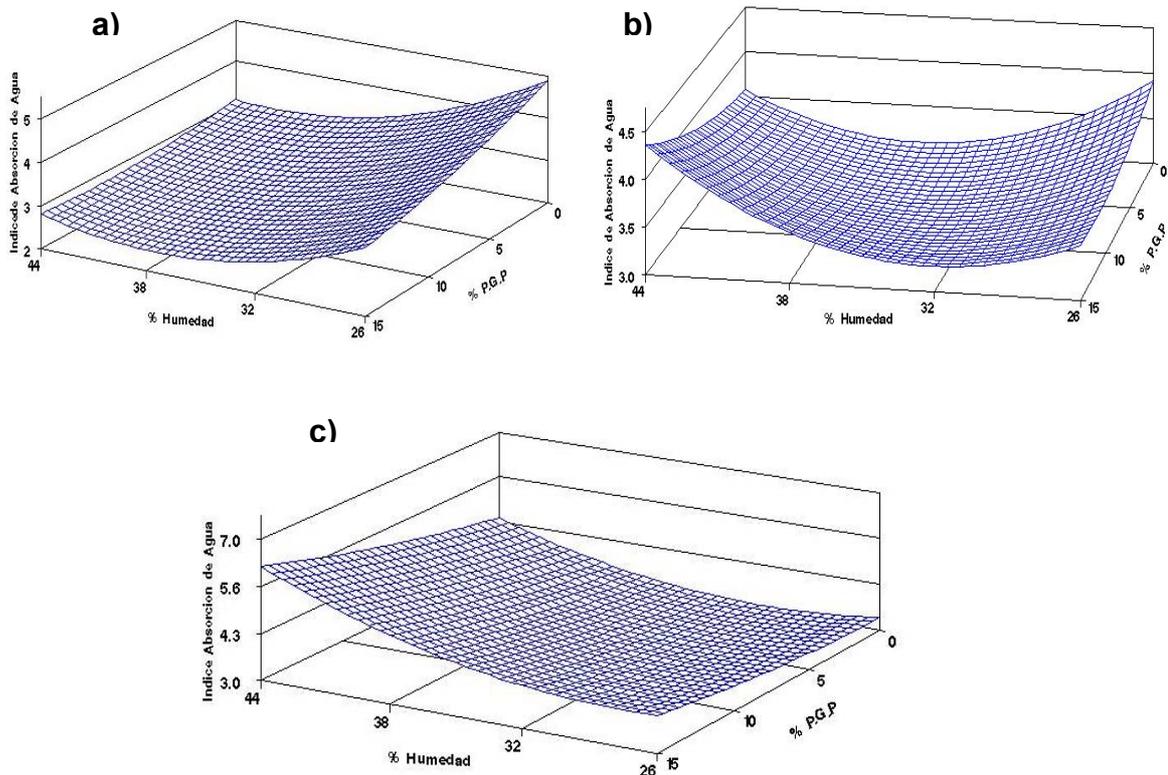
de fase por efecto de temperatura disminuyendo así el efecto anterior por lo que no alcanzan mayores valores de solubilidad.

#### **7.2.3.5 Índice de Absorción de Agua (IAA): Análisis de varianza y superficie de respuesta**

El Índice de Absorción de Agua es una de las características importantes en la elaboración de tortillas, indica la capacidad que tienen las harinas para retener agua, pues de esta depende su flexibilidad y rendimiento e (Almeida-Domínguez et., al 1996., Molina et.1979).

Los resultados en el análisis de varianza (Tabla 6) indican que la temperatura empleada durante la extrusión tiene un efecto altamente significativo ( $p < 0.01$ ) sobre el índice de absorción en agua, Así mismo la concentración de humedad y la interacción humedad-temperatura afectan de manera significativa. Los resultados obtenidos en el ANOVA indicaron que no existe un efecto significativo de los demás factores del modelo ni del cuadrático e interacciones entre estas pues se obtuvieron  $p > 0.05$ .

En la Tabla 7 se muestra el modelo de regresión empleado para el índice de Absorción en Agua, este obtuvo un valor aceptable en la correlación de los resultados a los datos experimentales con una  $p < 0.05$ , un Coeficiente de Variación 9.49 y una Correlación de 0.8313. El modelo tiene un excelente ajuste a los datos experimentales, por lo que el modelo se puede utilizar con confianza en la predicción sobre los valores del IAA



**Figura 12** Graficas de superficies de respuesta del índice de absorción de agua en las harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b)110°C y c)126 °C.

En la figura 12a se muestra la grafica de superficie de respuesta del índice de absorción de las harinas extrudidas a 93 °C. Las bajas humedades (26%) y baja concentración de PGP favorecen la capacidad de absorción de agua en las harinas, debido a la menor dextrinización de la estructura del almidón. Martínez-Bustos, et., al., 1998 menciona que las condiciones de extrusión alcalina modifican la estructura organizada del almidón e indican la formación de un complejo calcio-almidón en las regiones cristalinas, teniendo una influencia sobre el índice de absorción de agua. En la figura 12b se muestra la grafica de superficie de respuesta donde se observa como influye las altas concentraciones de PGP sobre el incremento del IAA para humedad mayor a 35%, cuando las condiciones de temperatura son de 110°C, sin embargo para menor humedad de 35% se observa el efecto contrario es decir que a menor concentración de PGP aumenta el IAA. Para temperatura de 126°C (figura 12c)

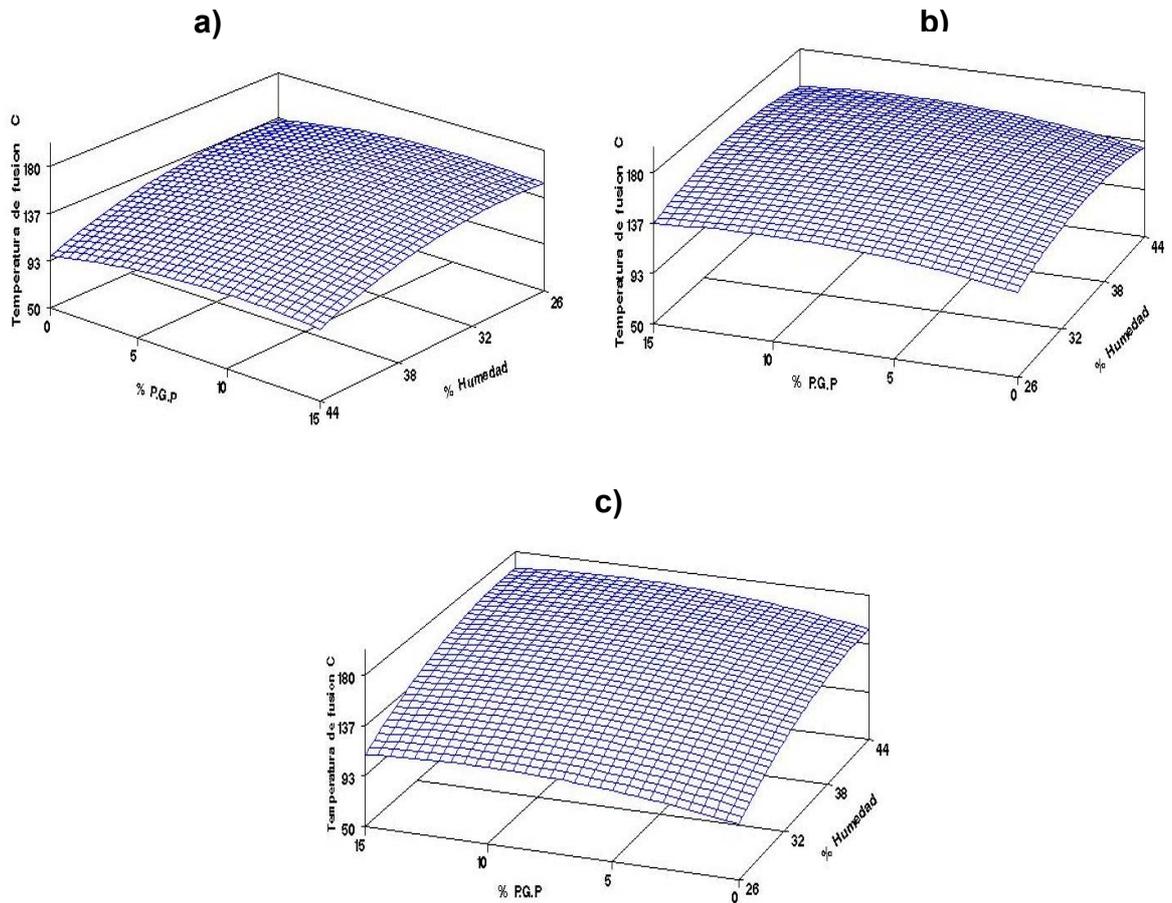
el incremento de la humedad favorece el aumento de IAA, no teniendo un efecto notable de la concentración de PGP, aunque disminuye a menor concentración de PGP. Las temperaturas altas con baja humedad durante la extrusión favorecieron una mayor hidrólisis en los gránulos de almidón y de los componentes del PGP, estas estructuras hidrolizadas tienen menor valor de IAA, El mayor valor máximo de IAA 6.0 se obtiene para alta temperatura, humedad y alta concentración de PGP, posiblemente estas condiciones propiciaron la formación de nuevas estructuras capaces de absorber mayor cantidad de agua. Whistler. (1993) mencionan que la estructura de la hemicelulosa es susceptible de sufrir modificaciones como efecto de las concentraciones de calcio. Conforme se incrementa la temperatura durante la nixtamalización se incrementa considerablemente la capacidad de retención de agua en las harinas nixtamalizadas por el proceso tradicional (Bello Pérez., et., al 2002)

#### **7.2.3.6 Temperatura de Fusión (TM): Análisis de varianza y superficie de respuesta**

Los resultados de los termogramas de las fases de transición realizadas por medio de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) de las harinas nixtamalizadas, se presentan los valores para la temperatura de fusión. En la tabla 5 se muestran los resultados de la temperatura de fusión (T<sub>m</sub>) de las harinas acondicionadas a diferentes concentraciones de PGP, humedad y temperatura de extrusión.

De acuerdo al análisis de varianza (Tabla 6) existen diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) del efecto de la concentración de PGP e interacción temperatura humedad empleada durante el proceso. El ANOVA del modelo indica que no existe un efecto significativo del resto de los términos del modelo ajustado a los datos experimentales.

En la Tabla 7 se muestra el modelo de regresión empleado para la temperatura de fusión, el modelo es adecuado para realizar una predicción, obteniendo una  $p \leq 0.05$ , Coeficiente de Variación de 6.37 y una Correlación de 0.6998.



**Figura 13 Graficas de superficies de respuesta de la temperatura de fusión( $T_m$ ) de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM a) 93 °C b) 110 °C y c) 126 °C**

En la figura 13a se observa como el efecto del porcentaje de humedad y la temperatura (93 °C) influye de manera importante sobre los valores  $T_m$ . A concentraciones altas de PGP y altos porcentajes de humedad presentaron valores de  $T_m$  más bajos (próximos a 90 °C) posiblemente estas condiciones propician una mayor fragmentación de los componentes de PGP y los transforma en compuestos que requieren una baja temperatura de fusión; sin embargo las concentraciones bajas de PGP y bajos porcentajes de humedad

no propician la fragmentación de los gránulos de almidón o esta es parcial de manera que los compuestos originados requieren una mayor temperatura de fusión.

Cuando las condiciones de extrusión se llevan a cabo a 110°C (Figura 12b) se observa que los porcentajes bajos de humedad y bajas concentraciones de PGP favorecen una ligera disminución de temperatura fusión; sin embargo los porcentajes de humedad entre 32-40% y altas concentraciones de PGP favorecen un incremento en la temperatura de fusión posiblemente estas condiciones durante la extrusión no favorecen la fragmentación de los componentes de PGP, también es posible la formación de complejos entre los constituyentes del PGP lípidos con los del almidón y complejos de Ca-almidón, estos nuevos compuestos requieren mayor energía para su fusión.

Las temperaturas altas (126°C) empleadas en la extrusión favorecen una disminución de T<sub>m</sub> cuando se emplean concentraciones bajas de PGP y de humedad, posiblemente estas condiciones favorecen la hidrólisis severa principalmente de los gránulos del almidón. Los porcentajes altos de humedad favorecen el aumento de los valores de T<sub>m</sub> principalmente cuando se emplean concentraciones altas de PGP lo que sugiere que altas concentraciones de humedad disminuyen la hidrólisis de los componentes de PGP o favorecen la formación de compuestos complejos indicados anteriormente los cuales requieren mayor cantidad de energía para su fusión.

#### **7.2.3.7 Índice de acidez: Análisis de varianza y superficie de respuesta**

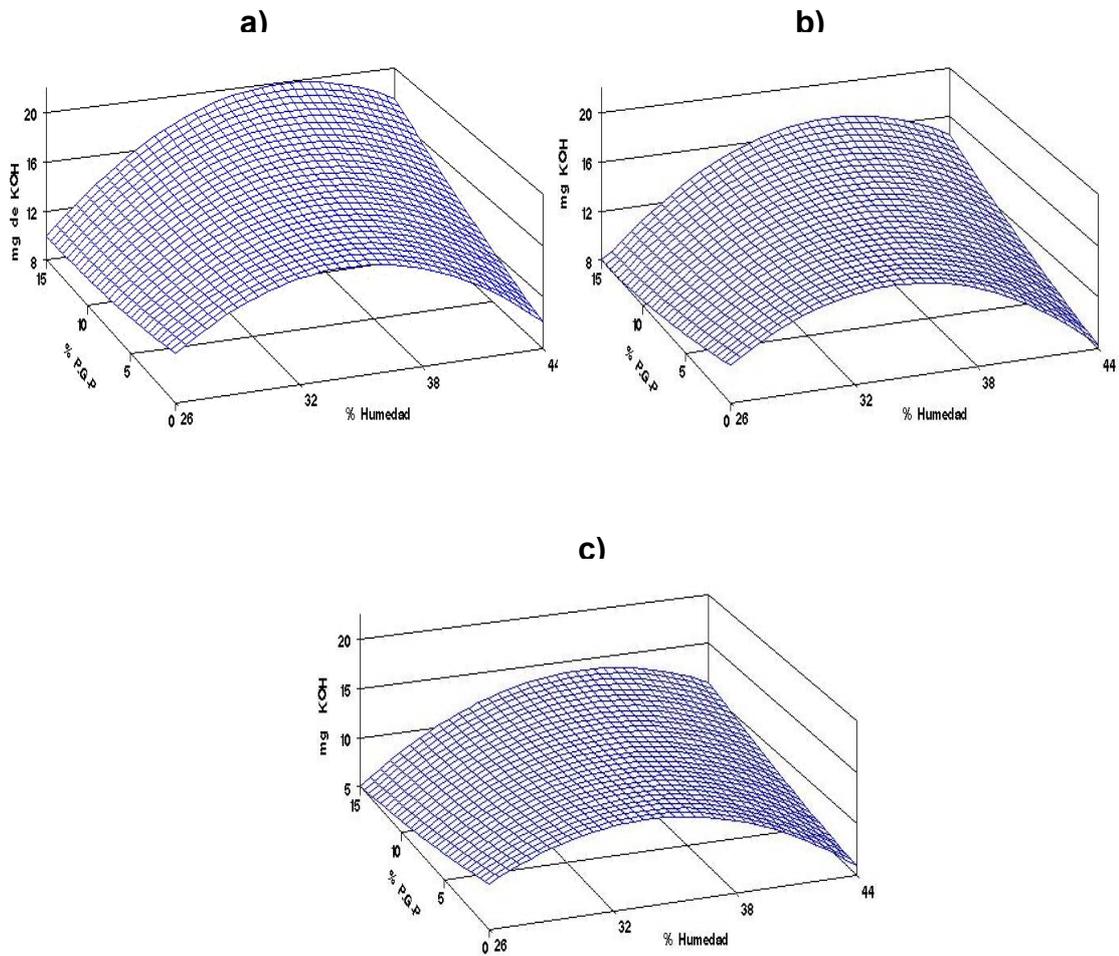
Uno de los primeros cambios que sufre el grano de maíz durante su almacenamiento es el desesterificación de los lípidos por la acción de las lipasas liberando ácidos grasos libres (Zeleny. 1978).

El deterioro de los lípidos durante su almacenamiento puede ser generado por la desesterificación de los ácidos grasos por el efecto hidrolítico de la enzima

lipasa, los ácidos grasos libres se transforman a compuestos volátiles a través de la autooxidación de los ácidos grasos insaturados, la autooxidación de los ácidos grasos es más rápida que la de los carbohidratos o proteínas, generando el proceso de rancidez y la formación de compuestos de bajo peso molecular al combinarse el oxígeno con las insaturaciones de los lípidos. El índice de acidez se define como el número de miligramos de hidróxido de potasio requeridos para neutralizar los ácidos grasos de una muestra seca de 100g calculados con una humedad en base seca (AACC; 1983)

Los resultados en el análisis de varianza (Tabla 6) indican que la temperatura, humedad, efecto cuadrático humedad y la interacción humedad y concentración de PGP presentan un efecto significativo ( $p < 0.06$ ) sobre el índice de acidez, los resultados obtenidos en el análisis de varianza indican que no existe un efecto significativo de los demás términos del modelo, obteniendo  $p > 0.05$ .

La Tabla 7 muestra el modelo de regresión empleado para el índice de Acidez en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM, este obtuvo un valor muy aceptable en la correlación de los resultados experimentales con los del modelo teniendo una  $p < 0.001$ , Coeficiente de Variación 8.94 y una Correlación de 0.9131. El modelo se ajusta muy bien a los datos experimentales por tanto es confiable para realizar la predicción sobre los valores del índice de acidez.



**Figura 14 Graficas de superficies de respuesta del índice de acidez (mg KOH/ 100g muestra seca) en harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C**

Los resultados de las graficas de superficies de respuesta (figura 14) muestran como la temperatura empleada durante la extrusión afecta los valores del índice de acidez incrementando principalmente a bajas temperaturas (93°C). En la figura 14a porcentajes de humedad bajos (26%) y altos (44%) aunados a concentraciones bajas de PGP favorecen un disminución de los valores de acidez una vez que la concentración e lípidos se encuentra mayoritariamente en el PGP y al no tener esta fracción se reduce el índice de acidez. En tanto altas concentraciones de fracciones de PGP (15%) y porcentajes de humedad entre 32-40 % favorecen la liberación de ácidos grasos durante el proceso, incrementando la acidez.

El incremento de la temperatura durante la extrusión favorece la disminución del índice de acidez (figura 14b y 14c) principalmente a temperaturas de 126°C en estas condiciones se alcanzan los valores mínimo del índice de acidez lo que sugiere que el empleo de temperaturas altas favorece la neutralización de los ácidos grasos liberados por al saponificación con el calcio del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la inactivación enzimática durante el proceso, principalmente cuando las concentraciones de PGP son altas y los porcentajes de humedad son bajos o cuando los porcentajes de humedad son altos y las concentraciones de PGP son bajas.

Humedad de 32-38% de proceso favorece valores altos de acidez similares a los obtenidos en las harinas nixtamalizadas por el proceso tradicional (18mg KOH/100g muestra seca) cuando las condiciones de extrusión se llevan a cabo a 93°C.

### 7.3 Análisis del perfil de textura en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas de FGM y masa (proceso comercial y tradicional)

#### 7.3.1 Análisis del Perfil de textura de fuerza de compresión de las tortillas elaboradas con masa comercial y tradicional.

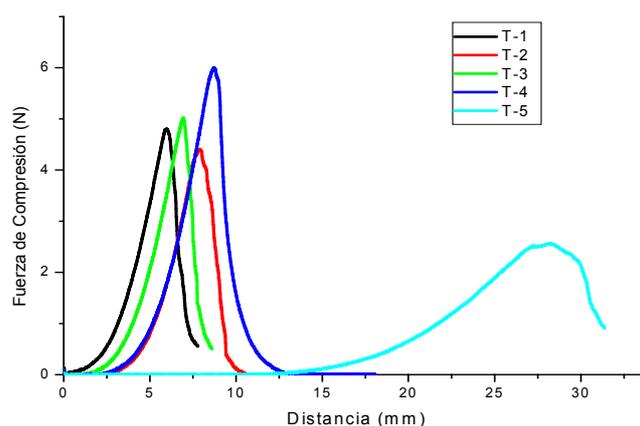


Figura 15 Fuerza de compresión de cuatro muestras de tortillas elaboradas con masa comercial (T1-T4) y harina nixtamalizada por el proceso tradicional (T5) de la región de Tlaxcala.

En la figura 15 se muestra el comportamiento de fuerza de compresión promedio de 5 diferentes tipo de tortillas, elaborada las 4 primeras con masa obtenidas en molinos comerciales y la última de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado por el proceso tradicional. De cada muestra se realizo cinco replicas y los que se presenta en esta figura 15 son los promedios obtenidos.

La fuerza de compresión y extensión son las característica texturales mas importante en las tortillas. Se realizó una evaluación de este comportamiento en tortillas elaboradas en forma comercial y tradicional para ver si existe diferencia en la resistencia de estas a fin de establecer un parámetro comparativo durante la evaluación de las tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM.

Los resultados de la Figura 15 muestran que las tortillas elaboradas con masas obtenidas en molinos comerciales presentaron mayor resistencia a la ruptura, menor cohesividad, mayor elasticidad, pero mayor rigidez que las tortillas elaboradas con masa obtenidas por el proceso tradicional, pues estas presentaron menor resistencia a la ruptura y a la elasticidad y mayor cohesividad pero menor rigidez, posiblemente estas variaciones en las muestras de tortillas comerciales y tradicionales se deban principalmente a que actualmente la mayoría de los molinos comerciales emplean como materia prima harina nixtamalizada, adicionada con algunas gomas, las cuales mejoran las características en la resistencia y el redimiendo de las tortillas (Jaime., 2002)., sin embargo estas no se conservan durante el recalentado originando un producto con mayor rigidez que las obtenidas por el proceso tradicional. Galicia., (2001) reporto una resistencia a la compresión para tortillas elaboradas por el proceso tradicional de 3.7 (N) valor que supera en poco el resultado obtenido en este análisis para las tortillas elaboradas por el proceso tradicional.

### 7.3.2 Análisis del Perfil de textura de fuerza de extensión de las tortillas elaboradas con masa comercial y tradicional.

La figura 16 muestra el comportamiento fuerza de extensión promedio de 5 diferentes tipo de tortillas elaborada las 4 primeras con masa obtenidas en molinos comerciales y la última de tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado por el proceso tradicional.

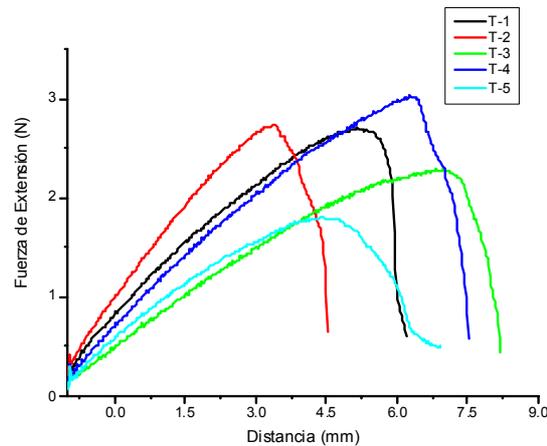
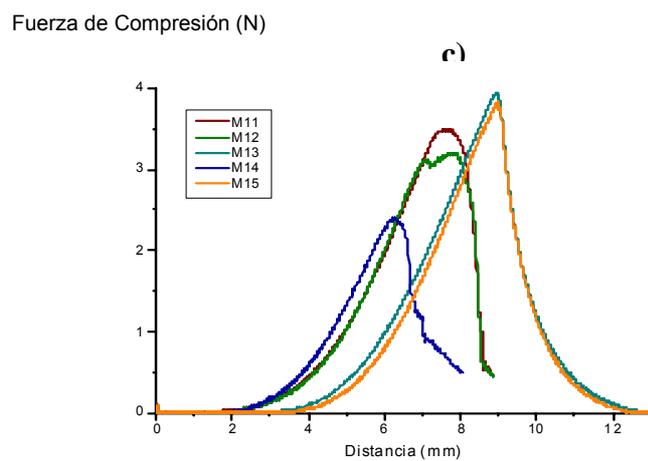
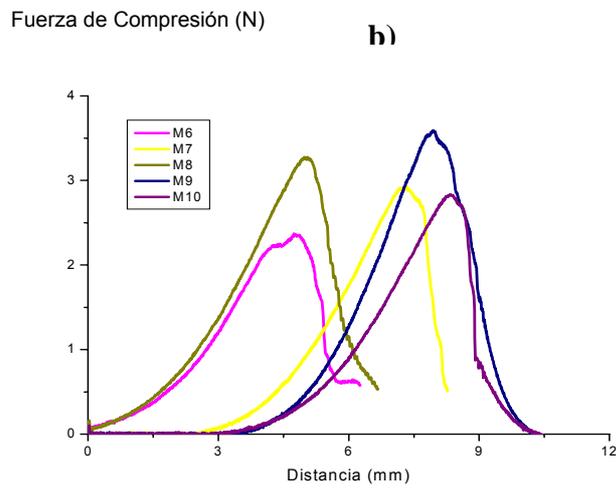
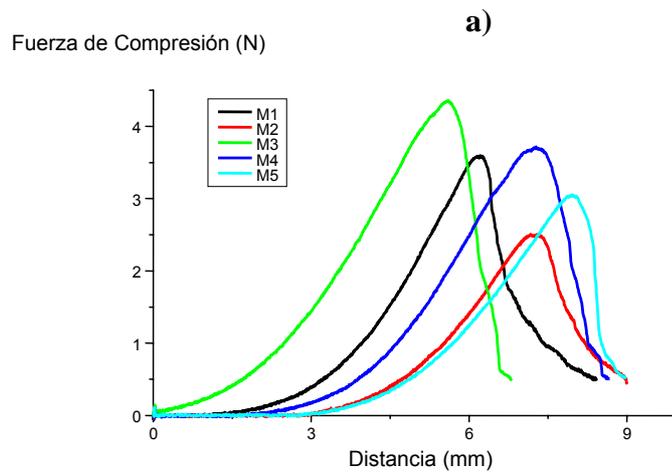


Figura 16. Fuerza de extensión de cuatro muestras de tortillas elaboradas con masa comercial y una de harina de maíz nixtamalizado de la región de Tlaxcala.

Los resultados de la fuerza de extensión de las tortillas elaboradas con masa comerciales fueron casi similares a los obtenidos en la fuerza de compresión, las graficas de estos tratamientos muestran que estas presentaron mayor resistencia a la extensión que las elaboradas por el proceso tradicional, lo que hace suponer que estas muestras contienen algún mejorador de textura.

### 7.3.3 Análisis del Perfil de textura de la fuerza de compresión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.

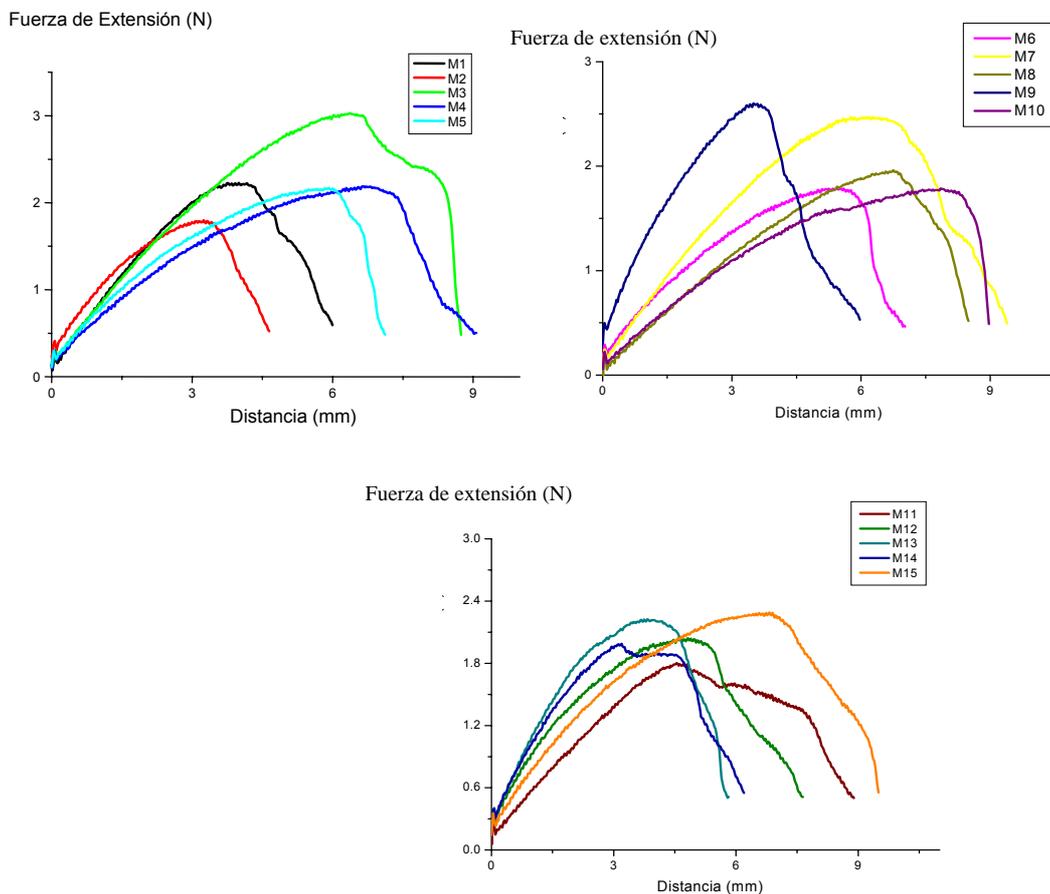
Figura 17 muestra las graficas de fuerza de compresión a la ruptura de las tortillas elaboradas por el proceso de extrusión de las fracciones del grano de maíz.



**Figura 17a,b,c Gráficos de fuerza de compresión de tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM**

Los resultados obtenidos en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión (Figura 17a,b,c) presentan un perfil de textura diferente a las elaboradas por el proceso tradicional y comercial, sin embargo la mayoría de las muestras superan la fuerza de compresión a las elaboradas por el proceso tradicional aunque la muestras 2, 6 y 14 presentaron resultados similares a la tradicional. Se observó también que la muestra 3 presentó una resistencia cercana a la obtenida en tortillas comerciales, aunque presentaron características menores de cohesividad, rigidez y elasticidad.

### 7.3.4 Análisis del Perfil de textura de la fuerza de extensión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM.



**Figura 18 Gráficos de la fuerza de extensión de las tortillas elaboradas por el proceso de nixtamalización por extrusión de las FGM**

Las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión presentaron menor resistencia a la extensión (Figura 18a, b y c) que las elaboradas con masa comerciales, pero mayores o iguales las elaboradas por el proceso tradicional. El perfil de ruptura de las muestras graficadas fueron semejantes al de las tortillas elaboradas con masas comerciales, observándose diferencias principalmente en las características de cohesividad, elasticidad y rigidez. Las muestras 10, 6 y 13 tuvieron mayor elasticidad y las muestras 14 y 11 presentaron menor elasticidad en comparación al resto de las muestras, así mismo se observó que las muestras 3, 10 y 6 tienen menor rigidez, Las muestras 2, 1 y 14 mayor rigidez.

Las diferencias en cuanto a la rigidez y elasticidad se pueden deber a la influencia que tiene la concentración de PGP en cada una de las muestras, la muestra 14 fue elaborada con una concentración de PGP del 15% y la muestra 13 con 0% de PGP.

#### **7.4 Resultados experimentales, análisis de varianza y modelos de regresión obtenidos de las variables respuesta analizadas en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM**

##### **7.4.1 Resultados experimentales de las variables respuestas**

En la Tabla 8 se muestran los resultados promedio de las principales características texturales evaluadas en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las fracciones de grano de maíz.

**Tabla 8 Promedio de los resultados experimentales de las variables respuesta obtenidas en tortillas elaboradas con harina nixtamalizadas por extrusión de las FGM.**

Ensayo	Variables Experimentales			Variables Respuesta			
	X1	X2	X3	Fuerza de compresión	Fuerza de extensión	Inflado	Rolabilidad
				(N)	(N)	(%)	(%)
1	100	30	3.069	3.7960	2.2843	5	1
2	100	30	12.069	2.5102	1.8390	1	3
3	100	40	3.069	4.3710	2.9310	1	1
4	100	40	12.069	3.7860	2.1976	4	2
5	120	30	3.069	3.870	2.2755	3	1
6	120	30	12.069	2.3076	1.8233	3	4
7	120	40	3.069	2.9946	2.4233	4	2
8	120	40	12.069	3.3586	1.9930	2	1
9	93	35	7.569	3.4400	2.6336	4	3
10	93	35	7.569	3.4635	2.6080	4	3
11	126	35	7.569	3.8955	1.8290	3	1
12	126	35	7.569	3.9420	1.9245	3	1
13	110	26.59	7.569	3.4860	1.8456	1	2
14	110	26.59	7.569	3.7250	1.7161	1	2
15	110	43.41	7.569	3.3990	2.0277	4	1
16	110	43.41	7.569	2.7950	1.9102	4	1
17	110	35	0	4.2340	2.3333	3	1
18	110	35	0	3.8880	2.3030	3	1
19	110	35	15.138	2.3820	2.0733	5	3
20	110	35	15.138	2.5140	2.1740	5	3
21	110	35	7.569	3.9454	2.2626	4	2
22	110	35	7.569	3.9330	2.1892	4	2
23	110	35	7.569	3.8888	2.3210	4	1
24	110	35	7.569	3.7950	2.3260	4	2
25	110	35	7.569	3.7360	2.3000	4	2
26	110	35	7.569	417.20	2.2970	4	2

**X<sub>1</sub> =Temperatura °C X<sub>2</sub> = % Humedad X<sub>3</sub> = % PGP**

## 7.4.2 Análisis de varianza y modelos de regresión

Con los resultados obtenidos en la tabla 8 se realizó el análisis estadístico obteniendo el análisis de varianza del modelo ajustado y de los términos que se consideraron en el modelo.

**Tabla 9 Análisis de varianza obtenidos de las variables respuesta en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por el proceso de extrusión de las FGM.**

Fuente de variación	Fuerza de Compresión Pr > F	Fuerza de extensión Pr > F	Inflado Pr > F	Rolabilidad Pr > F
<b>Lineal</b>				
<b>X<sub>1</sub></b>	0.6360 NS	0.0004**	0.0172*	0.0247*
<b>X<sub>2</sub></b>	0.6542NS	0.0157*	0.1252	0.0141*
<b>X<sub>3</sub></b>	0.0003**	0.0017*	0.2354NS	0.0001**
<b>Cuadrático</b>				
<b>X<sub>11</sub></b>	0.8076NS	0.2545NS	0.1684NS	0.4700NS
<b>X<sub>22</sub></b>	0.1258NS	0.0019*	0.0010**	0.2332NS
<b>X<sub>33</sub></b>	0.0112 *	0.9250NS	0.2929NS	0.5716NS
<b>Interacción</b>				
<b>X<sub>12</sub></b>	0.3055NS	0.1590NS	0.2064NS	0.5110NS
<b>X<sub>13</sub></b>	0.3202NS	0.5337NS	0.6665NS	0.5110NS
<b>X<sub>23</sub></b>	0.0751NS	0.5755NS	0.0010**	0.0040*

\* = significativo a  $p < 0.05$  y  $p < 0.01$  \*\* = Altamente significativo a  $p < 0.001$  NS= No Significativo NI= No Influye en el modelo de regresión X<sub>1</sub> = Temperatura °C X<sub>2</sub> = % Humedad X<sub>3</sub> = % PGP

**Tabla 10 Modelos de regresión obtenido del análisis de varianza de las variables respuestas en tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM**

<b>Coefficiente</b>	<b>Fuerza de compresión</b>	<b>Fuerza de extensión</b>	<b>Inflado</b>	<b>Rolabilidad</b>
<b>B<sub>0</sub></b>	-23.28746357	-8.063849254	44.67085666	-10.25415512
<b>Lineal</b>				
<b>β<sub>1</sub></b>	0.28224596	0.022973257	-0.66665220	-0.06527520
<b>β<sub>2</sub></b>	0.83945932	0.572527708	-0.86945320	0.73075141
<b>β<sub>3</sub></b>	-0.67812357	-0.0679447070	1.86410619	1.36371909
<b>Cuadrático</b>				
<b>B<sub>11</sub></b>	-0.00093906	0.000064589	0.00454042	0.00065521
<b>B<sub>22</sub></b>	-0.00847853	-0.005027734	0.02876566	-0.00444848
<b>B<sub>33</sub></b>	-0.01215611	-0.000167605	0.00933047	0.00323562
<b>Interacción</b>				
<b>B<sub>12</sub></b>	-0.00298050	-0.001719500	-0.00750000	-0.00250000
<b>B<sub>13</sub></b>	0.00320994	0.000822778	-0.00277778	-0.00277778
<b>B<sub>23</sub></b>	0.01191222	-0.00147889	-0.05000000	0.02777778
<b>R</b>	0.8391	0.8878	0.8661	0.8784
<b>C.V</b>	11.3578	7.5299	34.899	28.487
<b>P&gt;F</b>	0.0059	0.0006	0.0018	0.0010

C.V=Coeficiente de Variación r= Coeficiente de correlación NI= No Influye en el modelo de regresión X<sub>1</sub> = Temperatura °C X<sub>2</sub> = % Humedad X<sub>3</sub> = % PGP

Modelo de regresión empleado para estimar el comportamiento de las variables respuestas fue similar al presentado en el análisis de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM

$$Y = \beta_0 + \sum_i^n \beta_i X_i + \sum_i \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

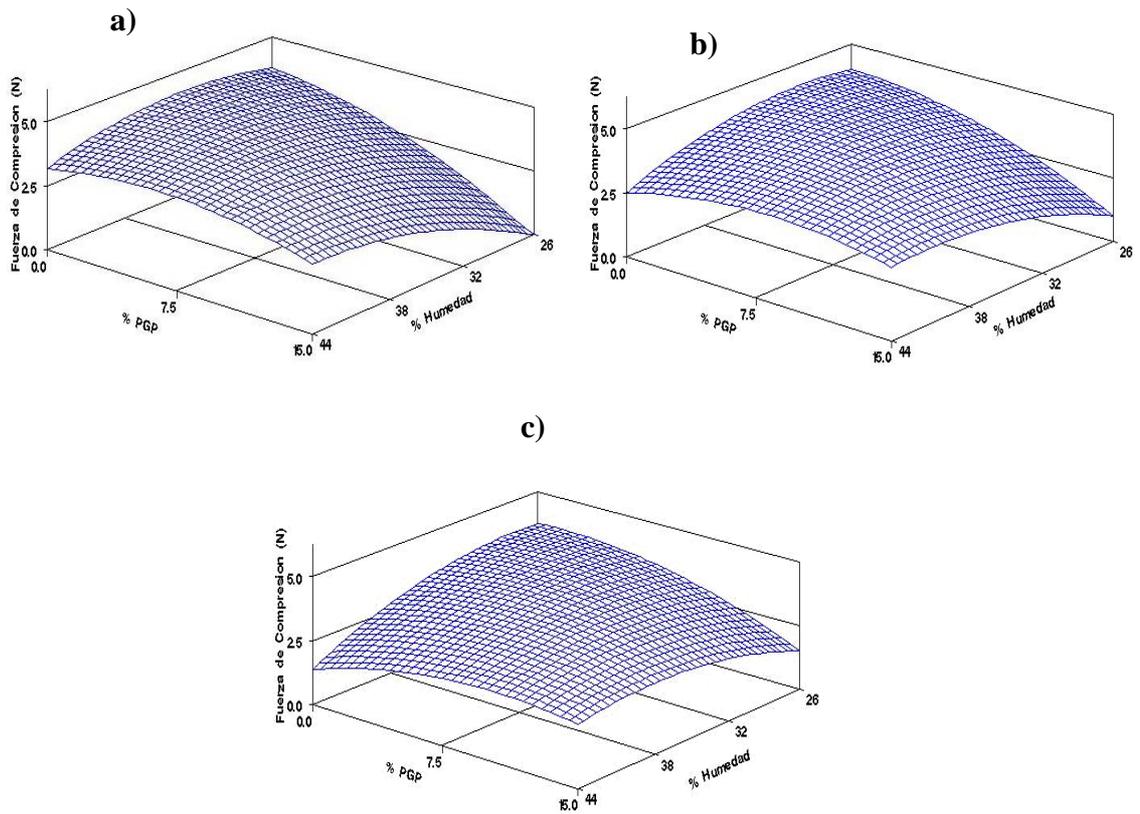
La ecuación anterior se empleo para estimar los modelos para cada una de las variables respuestas.

Las graficas de superficies de respuestas de determinaron a partir de los modelos de regresión determinados por el análisis de varianza y previa validación de los modelos para cada una de las variables respuestas.

#### **7.4.3 Fuerza de Compresión (N): Análisis de varianza y superficie de respuesta**

Los resultados en el análisis de varianza (Tabla 9) indican que la concentración de PGP y el cuadrático del efecto de la PGP presentaron un efecto altamente significativo ( $p < 0.001$ ) en la resistencia a la fuerza de compresión, no existe un efecto significativo del resto de las variables repuestas ni del cuadrático e interacciones entre estas pues se obtuvieron  $p > 0.05$ , por lo que la resistencia a la compresión que presentan las tortillas se debe principalmente a la influencia que ejerce la concentración de PGP y no de la temperatura y humedad de proceso.

En la Tabla 10 se muestra el modelo de regresión empleado para la fuerza de compresión en las harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM, obteniendo un valor bueno de correlación de los resultados experimentales con los datos predichos por el modelo ( $p < 0.005$ ), un Coeficiente de Variación 11.3378 y una Correlación de 0.8391. El modelo es confiable para realizar la predicción sobre la resistencia a la fuerza de compresión.



**Figura 19 Graficas de superficies de respuesta de la fuerza de compresión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C**

En la superficie de respuesta de la figura 19a se observa como la concentración alta de PGP en las harinas extrudidas a 93°C afectaron de manera drástica la resistencia a la fuerza de compresión en las tortillas elaboradas con harinas acondicionadas con bajos porcentajes de humedad y altas concentraciones de PGP; sin embargo los altos porcentajes de humedad favorecen de manera importante la resistencia a la fuerza de compresión. Concentraciones bajas de PGP (0%) favorecen considerablemente la resistencia a la compresión (entre 2.5 y 4.5 N) en las tortillas elaboradas con harinas acondicionadas entre 32-38 % de humedad, menores o mayores porcentajes de humedad disminuyen la fuerza de compresión de las tortillas.

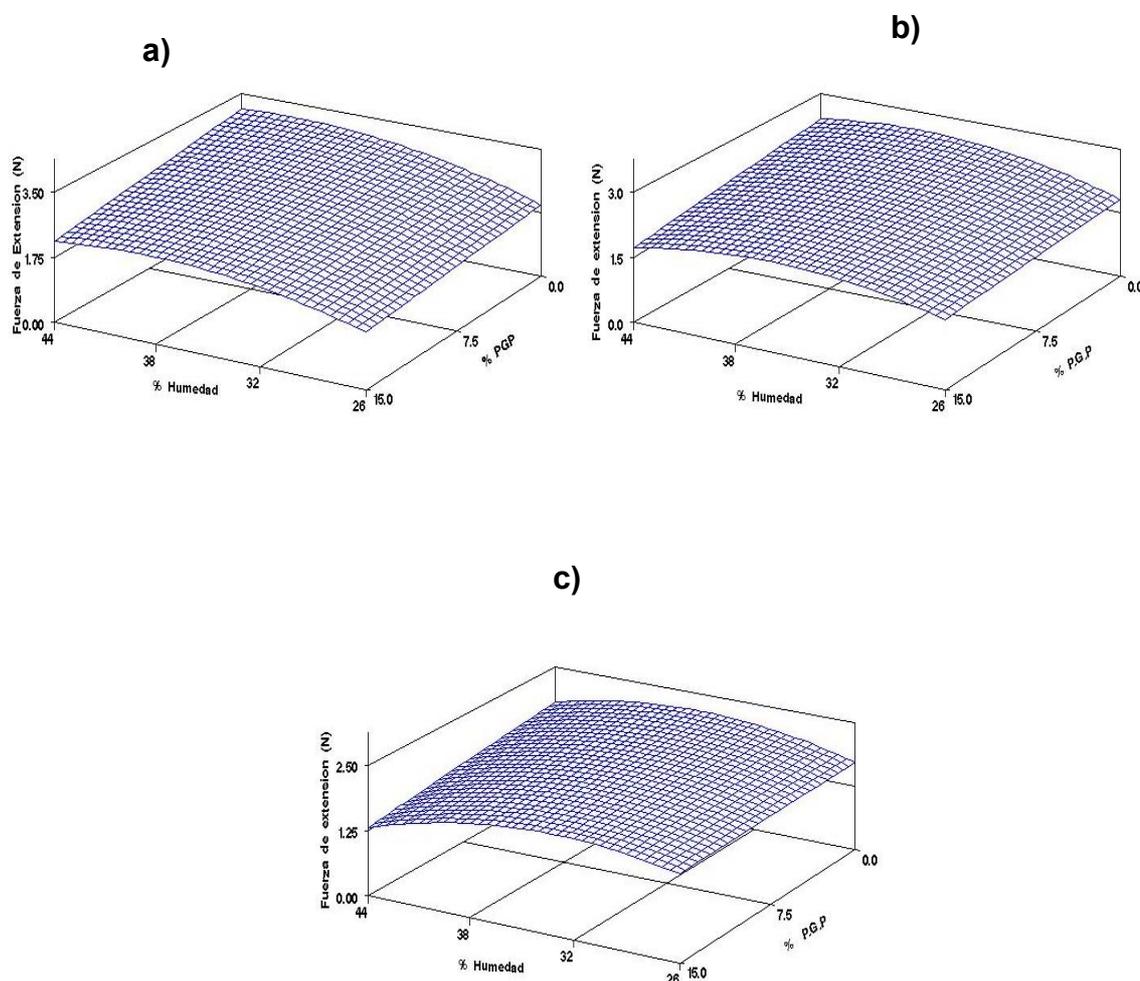
Las concentraciones bajas de PGP en las harinas extrudidas a temperaturas de 110°C y 126°C (figuras 19b, 19c) disminuye la resistencia a la fuerza de compresión en las tortillas (entre 1.5 y 3 N), comparadas a las obtenidas a 93°C. Posiblemente las temperaturas altas empleadas durante el cocimiento de las tortillas modificaron la estructura de los componentes formando masas con menor cohesividad por lo tanto menos resistentes a la fuerza de compresión. También es de destacar que en estas mismas condiciones se observa que los valores de IAA son menores para altas temperaturas, por lo que las harinas no se hidratan y absorben el agua adecuadamente, formando masas con menor consistencia. Para concentraciones bajas de PGP, humedad y altas temperaturas mejora fuerza de compresión (3.0 N) en las tortillas.

#### **7.4.4 Fuerza de extensión (N): Análisis de varianza y superficie de respuesta**

Un de los principales atributos que debe reunir una tortilla como parámetro de calidad es la flexibilidad, esta característica depende de varios factores que influyen directamente en la elaboración de la tortilla como tipo, variedad de grano y los cambios fisicoquímicos que ocurren en los componentes de grano de maíz durante el cocimiento térmico alcalino (Nixtamalización).

El análisis de varianza (Tabla 9) indica que la temperatura, concentración de PGP y humedad tienen un efecto altamente significativo ( $p < 0.001$ ) en la resistencia a la fuerza de extensión, del mismo modo el cuadrático de la humedad afecta de manera significativa esta característica. Sin embargo no existe un efecto significativo del resto de los términos del modelo.

En el tabla 10 se muestra el modelo de regresión empleado para la fuerza de extensión en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM, obteniendo un buen ajuste por el modelo a los datos experimentales ( $p < 0.001$ ), un Coeficiente de Variación 7.5299 y una Correlación de 0.8878. El modelo es confiable para realizar la predicción a través de las superficies e respuesta sobre la resistencia a la fuerza de extensión de las tortillas nixtamalizadas por extrusión.



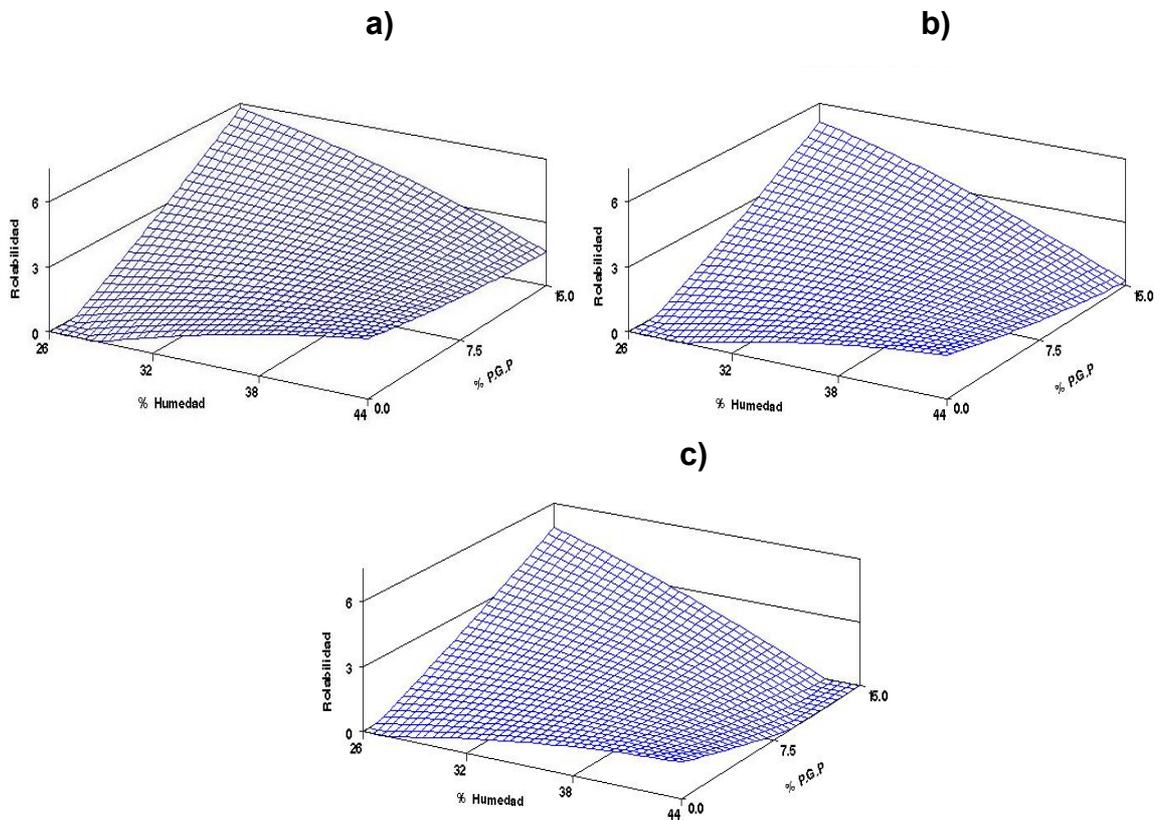
**Figura 20 Graficas de superficies de respuesta de la fuerza de extensión en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C**

La respuesta a la fuerza de extensión de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión se presenta en la figura 20 donde se observa como influye la temperatura y la concentración de PGP sobre los valores en la fuerza de extensión. Las concentraciones altas de PGP disminuyen de manera importante la fuerza de extensión hasta alcanzar el valor mínimo (1.25 N) en las tortillas con harina extrudidas a 126°C, independientemente de la concentración de humedad. Para temperatura de extrusión de 93°C, concentraciones bajas de PGP (0%) y altas de humedad (35%) de la harina se

obtiene tortillas que incrementan de manera considerable la resistencia hasta alcanzar su máximo valor de 3.2 N, estas condiciones favorecieron de manera importante la flexibilidad de las tortillas. Las harinas acondicionadas con bajas concentraciones de PGP y humedad disminuyeron la fuerza de extensión (1.75 N) en las tortillas elaboradas con harinas extrudidas a la misma temperatura (93°C). Conforme se incrementa la temperatura durante la extrusión se disminuyó la resistencia a la fuerza de extensión tanto a 110°C como a 126°C (incisos a y b figura) en comparación a la obtenida a 93 °C. En general se observa que las concentraciones bajas de PGP favorecen de manera importante la resistencia a la fuerza de extensión en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión alcanzando valores superiores o cercanos a los obtenidos en las tortillas elaboradas por el proceso tradicional.

#### **7.4.5 Rolabilidad: Análisis de varianza y superficie de respuesta**

Los resultados del análisis de varianza (Tabla 9) indican que la concentración de PGP, la temperatura el porcentaje de humedad e interacción humedad pericarpio tienen un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la capacidad de rolabilidad en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM. En el tabla 10 se muestra el modelo de regresión empleado para rolabilidad en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM. El modelo tiene un buen ajuste a los datos experimentales con una probabilidad  $p \leq 0.001$ , un Coeficiente de Variación 28.48 y una Correlación de 0.8784. El modelo es confiable para realizar la predicción a través de las superficies e respuesta sobre la rolabilidad de las tortillas



**Figura 21** Graficas de superficies de respuesta de la capacidad de rolabilidad que presentan las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C

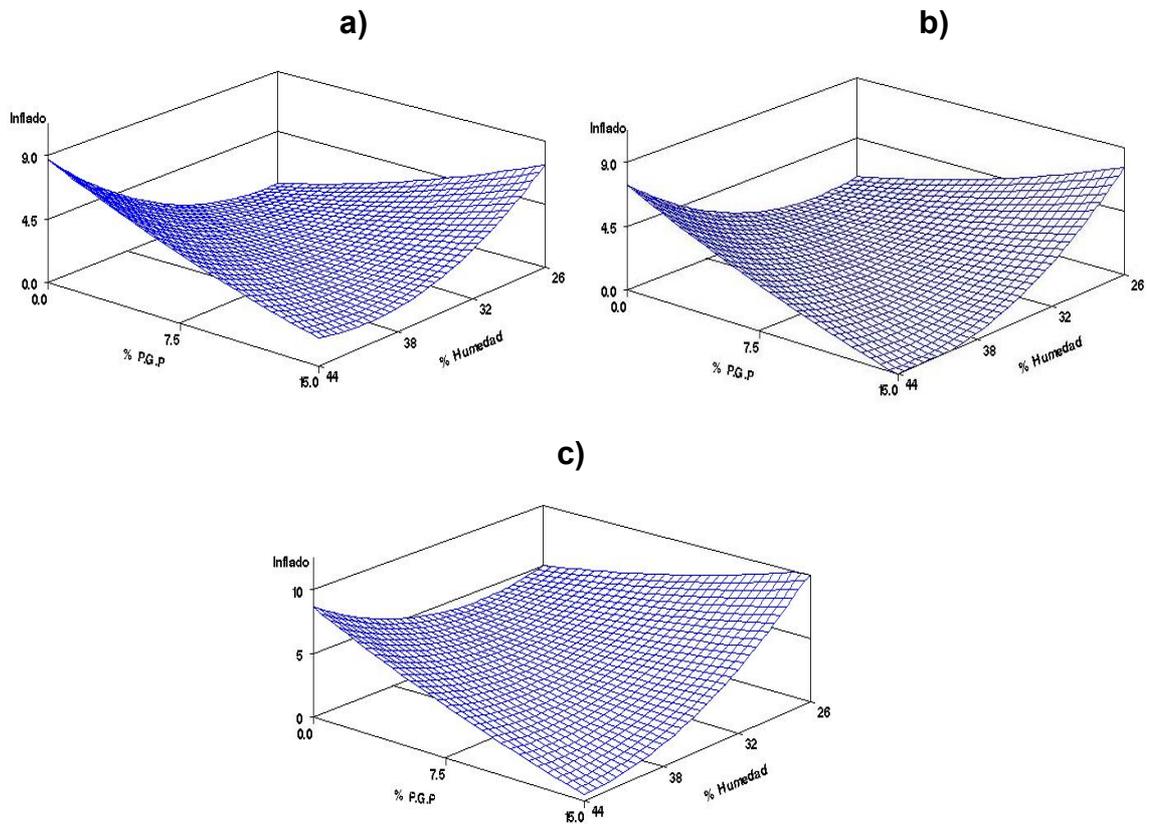
En la figura 21 se observa como influye la temperatura influye de manera importante en la rolabilidad de las tortillas. Las tortillas elaboradas con harinas extrudidas a temperaturas bajas (93°C) presenta una mejor propiedad de rolabilidad cuando se emplean concentraciones bajas de PGP (0%) y porcentajes de humedad entre 26-38%, de acuerdo con los datos obtenidos del IAA estas harinas absorben mayor cantidad de agua lo que permite que durante el proceso de cocimiento se propicie una mayor gelatinización e interacción de los componentes del almidón mejorando su textura en general. Sin embargo la rolabilidad decrece considerablemente cuando se emplea altas concentraciones de PGP (15%) y bajos porcentajes de humedad (26-28%) estas harinas presentan menor capacidad de absorción de agua (IAA) por lo

que no se favorece una buena interacción de los componentes durante el cocimiento de la tortilla.

Las altas temperaturas (110°C y 126°C) empleadas durante la extrusión favorecen de manera ligera la roabilidad en las tortillas elaboradas con harinas para altas concentraciones de PGP (15%) y altos porcentajes de humedad (44%) (figura 21b y 21c). Los porcentajes bajos de humedad (26-32) y las altas concentraciones de PGP (15%) propician una disminución considerable de la capacidad de roabilidad en las tortillas principalmente cuando se emplean bajas temperaturas de extrusión, en estas condiciones se obtienen tortillas totalmente quebradizas.

#### **7.4.6 Inflado: Análisis de varianza y superficie de respuesta**

Los resultados del análisis de varianza (Tabla 9) indican que la temperatura la interacción humedad concentración de PGP y el cuadrático del porcentaje de humedad tienen un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la capacidad de inflado de las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM. En el tabla 10 se muestra el modelo de regresión empleado para el porcentaje de inflado en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión de las FGM, este modelo fue validado por el análisis de varianza. El modelo tiene un buen ajuste a los datos experimentales con una probabilidad una  $p \leq 0.01$ , un Coeficiente de Variación 34.87 y una Correlación de 0.8661, El modelo tiene un buen ajuste y es confiable para realizar la predicción a través de las superficies de respuesta sobre el porcentaje de inflado en las tortillas elaboradas con las harinas procesadas.



**Figura 22 Graficas de superficies de respuesta del porcentaje de inflado en las tortillas elaboradas con harinas nixtamalizadas por extrusión a) 93 °C b) 110°C y c) 126 °C**

De acuerdo a la escala empleada durante la evaluación mencionada en materiales y métodos las superficies de respuestas de la figura 22 muestran el efecto que ejercen la temperatura, las concentraciones de PGP y el porcentaje de humedad sobre el porcentaje de inflado de las tortillas (figura 22a, 22b y 22c). Las concentraciones altas de PGP (15%) y bajas de humedad (26%) disminuyen de manera importantes los valores en el porcentaje de inflado o formación de ampolla durante el cocimiento de las tortillas. De igual manera las concentraciones altas de humedad y bajas de PGP disminuyeron esta característica en las harinas extrudidas a diferentes temperatura (93, 110 y 126°C)

Las concentraciones altas de PGP y altos porcentajes de humedad empleados durante la extrusión a diferente temperatura (93°C, 110°C y 126°C) propician un aumento en el porcentaje de inflado, estas condiciones favorecieron la formación de ampolla durante el cocimiento de las tortillas. Así mismo las concentraciones bajas de PGP y de humedad presentaron las mismas características anteriores cuando la temperatura de extrusión empleada en la elaboración de las harinas fue de 93°C (figura 22a), sin embargo conforme se incrementa la temperatura de extrusión la formación de la ampolla disminuye considerablemente sobre todo a 126 °C (figura 22c).

## VIII. CONCLUSIONES

- Las temperaturas bajas (93°C) empleadas durante la nixtamalización por extrusión de las harinas de FGM favorecen las características fisicoquímicas y de textura en las harinas y tortillas obtenidas con bajas concentraciones de PGP (0%) y humedades entre 32-38% presentando propiedades similares a las harinas y tortillas obtenidas por el proceso de nixtamalización tradicional.
- Las temperaturas altas empleadas durante la nixtamalización disminuyen las propiedades de viscosidad máxima a 90°C, IAA índice de acidez y aumentan la viscosidad máxima a 50°C, ISA y Tm en las harinas extrudidas con altas concentraciones de PGP y bajos porcentajes de humedad, las tortillas elaboradas con estas harinas presentan una menor resistencia a la fuerza de compresión y extensión, un bajo porcentaje de inflado y se quiebran completamente.
- El porcentaje de humedad propicia una disminución en las propiedades texturales, en las harinas extrudidas a altas temperaturas (126°C), con bajos porcentajes de humedad y bajas concentraciones de PGP afectando principalmente las características texturales de las tortillas
- Harinas acondicionadas con altas concentraciones de PGP (15%), altos porcentajes de humedad (44%) y extrudidas a altas (126°C) temperaturas favorecen una hidrólisis más severa en las estructuras de los componentes de PGP que las del endospermo, sin embargo las tortillas elaboradas con estas harinas presentan menor resistencia a la fuerza de compresión y extensión que las extrudidas a 93°C

- Las concentraciones altas de PGP favorecen el aumento del índices de acidez en las harinas extrudidas a diferentes temperaturas (93, 110 y 126°C), para porcentajes de humedad entre 32-38% disminuye de manera ligera a temperaturas altas (126°C).
- Harinas acondicionadas con porcentajes altos de humedad, altas concentraciones de PGP extrudidas a 126°C presentan los valores de fusión más altos, lo que sugiere la formación de complejos entre almidón calcio y lípidos alterando las propiedades fisicoquímicas de las harinas y disminuyen de manera general las características de textura de las tortillas.

## **IX. RECOMENDACIONES**

El proceso de nixtamalización por extrusión de las fracciones del grano de maíz es una alternativa para la elaboración de harinas instantáneas con buenas propiedades para la elaboración de tortillas con características similares a las del proceso tradicional; sin embargo es importante estudiar algunos aspectos que no fueron considerados en esta investigación como:

- El estudio de la función de las proteínas en el proceso de nixtamalización por extrusión de las fracciones del grano de maíz y su repercusión en el ámbito nutricional.
- Estudio de efecto que tienen el proceso sobre control de aflatoxinas en las harinas y tortillas .
- Estudio de las propiedades texturales, microbiológicas y sensoriales en las tortillas durante su almacenamiento (vida de anaquel)
- El estudio del proceso a nivel industrial empleando otras fuentes de maíz como materia prima.

## X. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. Aguilera José Miguel y Alvarado Juan de Dios.,(2001) Métodos para medir propiedades físicas en la industria de los alimentos., Editorial ACRIBIA, S.A. p. 160-188
2. Aguilera José Miguel.,(1997) Temas en Tecnología de alimentos., en reología de sólidos y textura Ed. IPN (CYTED). p. 215-260.
3. Almeida D. H., y Rooney W 1996. L Avances en la manufactura y calidad de productos de maíz nixtamalizado. Industria Alimentaría. Revista mexicana de difusión tecnológica para consulta. Nov-Dic. Edición especial dedicada al segmento de botanas, cereales, panificación y pastelería.
4. Almeida-Domínguez, H. D., Cepeda, M., and Rooney, L. W., 1996 properties of comercial nixtamalized corn flours. Cereal food World 41:624-630.
5. AOAC 1983 Oficial Methods of the American Association of Oficial Analytical Chemists Inc. D. C. USA.
6. Arambula V.G. Figueroa J.D:C., Martinez Bustos F., Orodica F. C. A, and Gonzales – Hernández. Milling and processing parameters for Corn tortillas from extruded Instant Dry masa Flour. J. Food Science 63 (2): 338-341.
7. Arámbula Villa G., Barrón Ávila L., González Hernández J., Moreno Martínez E.,y Luna Barcenas G (2001) Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (Zea mays L.) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales y texturales del grano, masa y tortillas de maíz.
8. Arambula-Villa G., González H., J. and Ondorica-Falomir C. A. (2001) Physicochemical, Structural and Textural Properties of Tortillas from Extruded Instant Corn Fluor Supplemnted with Various Types of Corn Lipids. Journal of Ceral Science 33: 245-252

9. Badui Dergal Salvador., (1999) Química de Alimentos Pearson Educación Editorial México.
10. Banks N. and Greenwood C. T., 1975 Starch and its components. Halsted Press Willy and Sons. New York. In Robles de T. R. R. 1986.
11. Bazua, C. D. , Guerra, R. y Strener, H. 1979 Extruded corn flour as an alternative to limetreated corn flour for tortilla preparation. J. Food Sci. , 44: 940-941.
12. Bedolla S ando Rooyner C. W 1982 Cooking maize for masa production Cereal Food World vol. 27:5
13. Bedolla S. 1982 Characteristic of U S and Mexican instant maize flour for tortilla and snack preparation.
14. Bedolla, S. , and Rooney C. , W. 1984. Characteristics of US and Mexican instant maize flour for tortilla snack preparations. Cereal Foods World, 29: 732-735.
15. Bello Pérez A., 2004 Almidón: Características estructurales, moleculares y digestibilidad., Libro de Memorias del primer Congreso Nacional de Nixtamalización del Maíz a la tortilla.
16. Bello Pérez L., Osorio Díaz P., Agama Acevedo E., Nuñez Santiago., Paredes López O., 2002. Propiedades Químicas, Fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizadas., J. Agrociencia 36: 319-328
17. Billaderis, C. G., Page C. M., Slande L. and Siret R. R. 1985. Thermal behavior of amilose-lipid complex. Carbohydr. Polym. 5:367-389
18. Boyer D. C. and Shannon C. J., 1987., Carbohydrates of the kernel. Cap 8 In: Corn Chemistry and Technology. (Eds Watson, S.A and Ramstand P. E.) America Association of cereal chemists., Inc. St. Paul. Min.
19. Bressani R Paz y Paz R. and Scrimshaw N. S., 1958 Maize nutrient losses: Chemical changes in corn during preparation of tortillas J. Agric. Food Chemistry 7:285-290.
20. Bressani R., Turcios J. C., Reyes L., y Mérida R. 2001 Caracterización física y química de harinas industriales nixtamalizadas de maíz de

consumo humano en América Central Archivos Latino Americanos de Nutrición 51:309-313

21. Cámara Nacional del maíz industrializado 2003., Principales cultivos en México, estimación y oferta de maíz en México.
22. Christensen, M. C. and Kaufmann, H. H. 1968 Grain Storage; the role of fungi in quality loss, University of Minnesota, p 65-75
23. Cory M. B. and Brucer R. H., 1997 Efficacy of lime on gelatinization of corn flour and starch., Cereal chemistry 74 (2): 171-175.
24. Del Valle ,F.R. 1972 Producción industrial, distribución y mercadeo de la harina para tortillas en México.
25. FAO 2005 Food and Agricultural Organization. El maíz en la nutrición humana- Cambios físicos y químicos durante la elaboración de tortillas.
26. FAO. 2004 Food and Agricultural Organization. El maíz en la nutrición humana. Colección FAO: Alimentación y Nutrición No 25 Roma.
27. Flores-Farías R., Martínez-Bustos. F., Salinas-Moreno. Y., Kil Chang Y., González Hernández J. and Ríos E. 2000 Physicochemical and rheological characteristics of commercial nixtamalised Mexican maize flour for tortillas. Journal of Science of food and Agriculture.
28. Galliard, T. and Bowler, P. 1987 Morphology and composition of starch. In "Starch: Properties and potential" ed. T. Galliard, pg 58-78 New York.
29. Gómez M. H. Mc Donough C. M., Rooney L.W., and Waniska R. D., 1989. Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla making. J. Food Science 54: 330-336.
30. Hosney R.C. 1991. Principios de ciencia y tecnología de los cereales ed. Acribia. España p. 45-55
31. Illescas R. 1943 La Teoría química de la formación de nixtamal. Rev. Sociedad Mexicana de Historia Natural 4:129
32. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) abasto y comercialización de productos básicos., México 1998.
33. Jane J. 1993 Mechanism of starch gelatinization in neutral salt solution. Starch/Staerke 45: 161-166

34. Khan M. N., Desrosiers M. C., Rooney L. W., Morgan R. G. and Sweat V. E.,(1982) Corn tortillas: evaluation of corn cooking procedures on lime-treated grit. *Journal Sci. Food. Agric.* 60:509-514.
35. Lásztity R. 1984. the chemistry of cereal proteins. CRC Press F.L USA p. 131-139.
36. Manners D. J. 1985 Some Aspects of the Structure of Starch., Department of Brewing and Biological Science Heriot-watt University Edinburgh, Scotland., *Cereal Foods World* pg. 461-467
37. Martínez B. F., Figueroa J. D. C and Larios S. A., 1996., High lysine extruded products of quality protein maize., *Journal Science Food Agric.* 71: 151-155
38. Martínez F. H. E. 1993 Elaboración de un alimento extruido, expandido tipo cereal para desayuno, con base en maíz y pasta de soya y cartamo., Tesis de maestría CINVESTAV México D.F
39. Martinez-Bustos F., Figueroa J. D. C., Sánchez-Sinencio F., González-Hernández J. Martínez-Montes J. L. and Ruíz-Torres M., 1996 Extrusion apparatus for preparation of instant fresh corn dough or masa. United State Patent 5558886.
40. Martinez-Bustos F., Martínez-Flores H. E., Sanmartín-Martínez E., Sánchez-Sinencio, F., Chang Y.K., Barrera-Arellano D and Ríos E., 2001. Effects of the components of maize on the quality of masa and tortilla during the tradicional nixtamalisation process.
41. Martínez-Bustos, F., Chang Y. K, Bannwart A.C., Rodríguez M.E., Guedes P. A., Gaiott E. R. 1998. effects of calcium hidroxide and processing conditions on corn meal extrudates. *J. Creal Chemistry* 75(6): 796-801
42. Mendoza F. C 1975 Method for obtain nixtamalizard flour USA Patent 3859452
43. Molina, M.R Letona, M and Bressani, R 1977 Drum-drying for improved production of instant tortills flour. *Journal Food Science.*, 42: 1432-1434
44. Montemayor E. and Ribio M.,1983 Alkaline cooked corn flour: technology and uses tortilla and snack products *Cereal World* 28:577

45. Montgomery C. Douglas (2003) *Diseño y Análisis de Experimentos* Ed. Limusa Wiley.
46. Morad M. M. O F., Rooney L. W and Earp C. F 1986 physicochemical properties alkali-cooked corn using traditional and presoaking procedures *Cereal Chemistry* 63 (3): 259
47. Oosten, B. J. 1982. Tentative hypothesis to explain how electrolytes affect the gelatinization temperature of starches in water starch/staerke 34: 233-239
48. Osman E. M. 1975. Interaction of starch with other components of food systems. *Food Technology* 30-44
49. Paredes López, O., and Saharapolus M.E., J. 1982 Scanning electron microscopy studies of limed corn kernels for tortilla making *Food Technology* 17, 687-693 (1992)
50. Paredes López, O., and Saharapolus M.E., 1983 Maize A review of tortilla technology *Brakern Digets* 16-25
51. Pérez Delgado Adela 1996 Adición de Proteínas de soya al maíz., *Asociación Americana de Soya CAT*. No 65: 1-2.
52. Pflugfelder R. L., Rooney, L. W., and Waniska., D. R., 1988a Dry matter losses in commercial corn masa production. *J. Cereal Chemistry* 65:127-132.
53. Pflugfelder R. L., Rooney, L. W., and Waniska., D. R., 1988b. fractionation and composition of commercial corn masa *J. Cereal Chemistry* 65:262-266
54. Reyes-Moreno., Milán-Carrillo J., Gutiérrez-Dorado R., Paredes-López O., Cuevas-Rodríguez E.O., and Garzón-Tiznado 2003 Instant flour from quality protein maize (*Zea mays* L.) Optimization of extrusion process. *Lebensm.-Wiss u.-Technol* 36: 685-695.
55. Robles DT. R. R., 1986. Cambios fisicoquímicos del almidón durante la nixtamalización de maíz. Tesis de maestría, ENCB-IPN México, D.F
56. Rodríguez M. E., Yañez J. M ., Figueroa J.D.C., Martínez. B. F., Gonzalez H. J. and Martínez M.JL. 1995., The influence of slaked lime content on the processing conditions of cooked maize tortillas changes of

- thermal, structural and rheological properties Z. Lebens Unters Forsch., 201:236.240.
57. Rodríguez P., San Martín M. E., y González C. E., (2001), Calorimetría diferencial de barrido y rayos X del almidón obtenido por nixtamalización fraccionada Superficie y Vacío 13, 61-65
  58. Salinas M. Y., Martínez B. F y Gómez H. J. (1992). Comparación de métodos para medir dureza del maíz. Archivos Latino Americano de Nutrición vol. 2 pg. 59-63.
  59. Seib P.A and Stearns M. 1972. extrusion processing of wheat starch Cereal Chemistry 17(9): 102-107.
  60. Serna Saldivar O., (2001) Química, almacenamiento e industrialización de los cereales . AGT Editorial S.A. México. Primera reimpresión. Pg. 219-221
  61. Serna-Saldivar O. et., al 1996., Química y almacenamiento e industrialización de los cereales., Ed. AGT S.A México.
  62. Slande, L and Levine . H. 1991 Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety. Critical Review in food Science and nutrition, 30: 115-360
  63. Suhendro E. L., Almeida D. H. D., Rooney L. W., and Waniska R. D., (1998) Objective Rollability Method for Corn Tortilla Textura Measurement Journal Cereal. Chem. 75(3) 320-324
  64. Thomas, D. J. and Atwell, W. A., 1999 starch modifications. In: Starches. Eagan Prees Handbook series. St. Paul MI, USA pg 31-48
  65. Vaqueiro M. C. and Reyes P. 1986 Process for producing nixtamalized corn flour USA Patent 4594260
  66. Vivas N. E., Waniska R. D. and Rooney L.W. (1987) Effect of tortilla on proteins in sorghum and mize. Cereal Chemistry 64 (6): 384-389.
  67. Whistler, R. L. 1993 Hemicellulose In: industrial Gums. Academic Press Inc., 3er edition pg. 295-308.
  68. Zeleny, L. 1978 Química Física y cambios nutritivos durante el almacenamiento, en Almacenamiento de cereales y sus productos, ed por Anderson, A.J and A.W Alcock

69. Valor Reed A. R., 2002 Fijación del calcio en la nixtamalización: estudio de las sales de calcio de ácidos carboxílicos alifáticos Tesis de Doctorado CICATA-IPN México DF
70. Reguera E., and Sánchez S. F., 2000 Nixtamalización del maíz: Ciencia e innovación tecnológica en: Nixtamalización estudios básicos parte I CICATA-IPN México p 10-20
71. Jaime F. M. R., 2002 Estudio de las variables de un nuevo proceso de nixtamalización fraccionada de maíz (*Zea mays*) en la elaboración de harina instantánea y tortillas., Tesis de maestría CICATA-IPN México.
72. Galicia G. T., 2002., Nixtamalización de maíz integral por extrusión para la producción de harina de maíz instantánea., Tesis de Licenciatura UACH Texcoco México.
73. Fernández-Muñoz J. L; Zelaya-Angel O; Cruz-Orea A; and Sánchez-Sinencio F. 2001; Phase transitions in amilose and amylopectin Under the influence of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in aqueous solution. Analytical sciences Vol 17 p 338-341
74. Fernández-Muñoz J. L; 2002 Caracterización físico-químico de biopolímeros derivados del maíz sometidos a tratamiento térmico-alcalino. Tesis de Doctorado CICATA-IPN México DF.
75. San Martín- Martínez E, Jaime-Fonseca M. R, Martínez-Bustos F and Martínez-Montes J. L. (2003) Selective nixtamalization of fraction of maize grain (*Zea mays* L.) and their use in the of instant tortilla flours analyzed using response surface methodology. Cereal Chemistry 80(1): 13-19.
76. Thomas J. D and Willian A.A; 1999 Starches in starch structure p. 1-12 Ed. Eagan Press Handbook series

## XI ANEXOS

Termogramas de las harinas nixtamalizadas por extrusión de las fracciones del grano de maíz

