



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**PROPIEDADES TECNOLÓGICAS EN TORTILLAS  
DE MAÍZ PRODUCIDAS CON NIXTAMALIZACIÓN  
POR INFRARROJO**

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**DAMIÁN ZAMORA RODRÍGUEZ**

**ASESOR: Dr. ABRAHAM MÉNDEZ ALBORES**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

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

UNAM  
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. EN C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

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

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

**Propiedades tecnológicas en tortillas de maíz producidas con nixtamalización por infrarrojo**

Que presenta el pasante: Damián Zamora Rodríguez  
Con número de cuenta: 404099877 para obtener el Título de: Ingeniero en Alimentos

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

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 13 de noviembre de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en I. Fernando Beristain	
VOCAL	Dra. Sara Esther Valdés Martínez	
SECRETARIO	Dr. Abraham Méndez Albores	
1er. SUPLENTE	Dra. Elsa Gutiérrez Cortez	
2do. SUPLENTE	Dr. Sergio Jiménez Ambriz	

NOTA: los sindocales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/iac

## **Prólogo**

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio 14 (Alimentos, Micotoxinas y Micotoxicosis) de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria. Con parte de la información obtenida se publicó un artículo científico en la revista Journal of Food and Nutrition Research, ISSN: 1336-8672, factor de impacto: 0.600, Journal Citation Reports 2012.

## **Agradecimientos**

A mis abuelitos Cristobal y Felipa, no me alcanza la vida para agradecerles todo lo que han hecho por mí, simplemente les debo todo.

A mis padres Miguel Ángel y Ruth, sin ustedes no habría llegado hasta aquí, gracias por impulsarme a seguir adelante y no dejarme caer.

A mi tío Raúl y mi tía Lidia, más que tíos son como mis padres adoptivos, gracias por estar siempre.

A mi abue Sofía y mis tíos Ernesto, Cecilio y Juan por su apoyo y cariño.

A mis hermanos Isabel, Ixchel y Raúl, por todos los momentos buenos y malos que hemos pasado juntos y por los que nos faltan.

A la UNAM, por ser mi segundo hogar, plantearme verdaderos retos y hacerme ver mi suerte de vez en vez, pero más que nada por la formación que recibí de ella.

A mis amigos Raúl, Antonio, Denisse, Diana y Felipe, por las horas compartidas (en clase, en las canchas y en laboratorios), por ser cómplices, compañeros y guías, gracias por su ayuda y por su tiempo.

A mis profesores por su tiempo, paciencia y consejos.

A Luis Coronilla, sempai nunca terminaré de conocerte gracias por mostrarme diversos caminos.

A Soka Gakkai por ayudarme a conocerme y hacer de mí una mejor persona; Nam Miojo Rengue Kio.

A mi asesor Abraham Méndez quien ha sido maestro y amigo en los momentos justos, gracias por expandir mi mente y por apoyarme en este gran paso, no pude tener mejor asesor.

## **Agradecimientos institucionales**

A la Dra. Natalia Palacios Rojas perteneciente al laboratorio de calidad nutricional y análisis de tejido vegetal del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por su apoyo en la realización de los análisis composicionales y nutrimentales de los granos de maíz y de las tortillas.

Al Dr. Gerónimo Arámbula Villa del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) unidad Querétaro del Instituto Politécnico Nacional (IPN), por su apoyo en la realización de los análisis viscoamilográficos de los granos de maíz y de las tortillas.

## Índice

<b>Listado de tablas</b> .....	I
<b>Listado de figuras</b> .....	II
<b>Abreviaturas</b> .....	III
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>ANTECEDENTES</b> .....	4
<b>1. Generalidades del maíz</b> .....	4
<b>1.1. Descripción y origen del maíz</b> .....	4
<b>1.2. Estructura del grano de maíz</b> .....	5
<b>1.3. Composición del grano de maíz</b> .....	6
<b>1.3.1. Almidón</b> .....	7
<b>1.3.2. Proteína</b> .....	7
<b>1.3.3. Lípidos</b> .....	8
<b>1.3.4. Azúcares libres</b> .....	9
<b>1.4. Producción e importancia del grano de maíz en México</b> .....	9
<b>1.4.1. Producción de maíz</b> .....	9
<b>1.4.2. Consumo de maíz</b> .....	9
<b>2. La tortilla de maíz</b> .....	10
<b>2.1. Proceso de elaboración de la tortilla por el método tradicional</b> .....	10
<b>2.1.1. Nixtamalización</b> .....	10
<b>2.1.2. Molienda del nixtamal</b> .....	11
<b>2.1.3. Elaboración de las tortillas</b> .....	11
<b>2.1.4. Almacenamiento de las tortillas</b> .....	11
<b>2.2. Cambios importantes durante la elaboración de las tortillas</b> .....	12
<b>2.2.1. Transformación grano-masa</b> .....	12
<b>2.2.2. Transformación masa-tortilla</b> .....	12
<b>2.3. Procesos alternos de nixtamalización</b> .....	13
<b>2.3.1. Proceso de nixtamalización ecológico</b> .....	13
<b>2.3.2. Proceso de nixtamalización por extrusión</b> .....	14
<b>2.3.3. Proceso de nixtamalización por calentamiento óhmico</b> .....	14

2.3.4. Proceso de nixtamalización con pre-remojo .....	15
2.3.5. Proceso de nixtamalización tradicional con cocción a presión.....	15
2.3.6. Proceso empleando cámara de vapor .....	15
2.3.7. Proceso dieléctrico de nixtamalización .....	16
2.3.8. Proceso de nixtamalización selectiva .....	16
2.3.9. Proceso de nixtamalización con microondas (PNM).....	17
3. Generalidades de la radiación infrarroja (IR) .....	17
3.1. Calentamiento por IR.....	18
3.2. Principios de calentamiento por IR.....	18
3.3. Clasificación de la radiación IR.....	19
3.4. Ventajas de la radiación IR.....	20
3.5. Usos principales de la radiación IR.....	21
4. Objetivos .....	21
4.1. Objetivo general.....	21
4.2. Objetivos particulares .....	21
4.3. Hipótesis.....	22
4.4. Cuadro metodológico.....	23
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
5.1. Caracterización física del grano de maíz .....	24
5.1.1. Tamaño del grano .....	24
5.1.2. Peso de 1000 granos.....	24
5.1.3. Peso hectolítrico .....	24
5.2. Propiedades fisicoquímicas del grano de maíz.....	25
5.2.1. Contenido de humedad .....	25
5.2.2. pH.....	25
5.2.3. Color .....	25
5.3. Procesamiento de las unidades experimentales.....	26
5.3.1. Nixtamalización .....	26
5.3.2. Molienda del nixtamal.....	27
5.3.3. Troquelado de la masa .....	28
5.3.4. Cocimiento de las tortillas.....	28
5.4. Propiedades de calidad tecnológica de las tortillas.....	28
5.4.1. Grado de inflado.....	28
5.4.2. Pérdida de peso durante la cocción.....	29

5.4.3. Rolabilidad .....	29
5.5. Propiedades fisicoquímicas de las masas y las tortillas .....	30
5.5.1. Contenido de humedad .....	30
5.5.2. pH.....	30
5.5.3. Color .....	30
5.6. Propiedades composicionales de las tortillas.....	31
5.6.1. Proteína .....	31
5.6.2. Lípidos .....	31
5.6.3. Fibra.....	32
5.6.4. Cenizas.....	33
5.7. Propiedades nutrimentales de las tortillas.....	33
5.7.1. Lisina .....	33
5.7.2. Triptófano .....	34
5.7.3. Digestibilidad de la proteína <i>in vitro</i> .....	34
5.8. Propiedades viscoamilográficas.....	35
5.9. Diseño experimental y análisis estadístico.....	36
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
6.1. Propiedades físicas de los granos de maíz .....	37
6.2. Propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz.....	38
6.3. Composición química de los granos de maíz .....	39
6.4. Propiedades nutrimentales de los granos de maíz .....	40
6.5. Propiedades fisicoquímicas (contenido de humedad y pH) de la masa y el nejayote.....	40
6.6. Propiedades fisicoquímicas de las tortillas .....	42
6.6.1. Contenido de humedad .....	42
6.6.2. pH.....	43
6.6.3. Color .....	44
6.7. Propiedades de calidad tecnológica de las tortillas.....	45
6.7.1. Grado de inflado.....	45
6.7.2. Rolabilidad .....	46
6.7.3. Pérdida de peso en la cocción .....	46
6.8. Propiedades composicionales de las tortillas.....	47
6.8.1. Proteína .....	47
6.8.2. Lípidos .....	48
6.8.3. Fibra.....	49

6.8.4. Cenizas.....	49
6.8.5. Carbohidratos.....	49
6.9. Propiedades nutrimentales de las tortillas.....	50
6.9.1. Lisina.....	50
6.9.2. Triptófano.....	50
6.9.3. Digestibilidad de la proteína <i>in vitro</i> .....	51
6.10. Propiedades viscoamilográficas.....	52
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXO.....	64

## Listado de tablas

Tabla 1. Porcentaje de distribución ponderal de las partes principales del grano de maíz .6	6
Tabla 2. Composición química proximal de las partes principales del grano de maíz .....6	6
Tabla 3. Contenido de aminoácidos esenciales de las proteínas del germen y el endospermo del maíz.....8	8
Tabla 4. Propiedades físicas del grano de maíz.....37	37
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del grano de maíz.....38	38
Tabla 6. Composición química del grano de maíz .....39	39
Tabla 7. Propiedades nutrimentales de los granos de maíz .....40	40
Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas de la masa y el nejayote obtenidos de la nixtamalización tradicional e IR.....41	41
Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización.....43	43
Tabla 10. Propiedades de calidad tecnológica de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización .....45	45
Tabla 11. Composición química de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización.....47	47
Tabla 12. Propiedades nutrimentales de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización.....50	50

## Listado de figuras

Figura 1. Corte longitudinal del grano de maíz.....	5
Figura 2. Representación esquemática del espectro electromagnético .....	19
Figura 3. Potenciómetro Conductronic PC 45.....	25
Figura 4. Colorímetro Minolta Cr-300.....	26
Figura 5. a) horno de radiación infrarroja con sistema de convección, b) tubo de cuarzo con resistencia emisora de radiación IR .....	27
Figura 6. a) molino y b) piedras utilizados para la elaboración de la masa de maíz.....	27
Figura 7. Inflado característico de las tortillas de maíz a) nixtamalización tradicional, b) nixtamalización por IR. ....	29
Figura 8. Viscoanalizador RVA-4.....	36
Figura 9. Perfiles viscoamilográficos de: A) harina de grano de maíz, B) tortillas obtenidas con la nixtamalización por IR, y C) tortillas obtenidas con la nixtamalización tradicional. ....	52

## Abreviaturas

AACC	American Association of Cereal Chemists
ANDEVA	Análisis de varianza
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
AS-900	Variedad del maíz utilizado en la experimentación
b. s.	Base seca
CA	Corriente alterna
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de calcio (cal)
CD	Corriente directa
CINVESTAV	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
cm	Centímetro(s)
cP	Centipoise(s)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FAO	Food and Agricultural Organization
FeCl <sub>3</sub>	Cloruro de hierro
FESC	Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán- UNAM
FMOC	9-fluorenilmetil-cloroformiato
g	Gramo(s)
GIMSA	Grupo Industrial Maseca S.A.
h	Hora(s)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
hL	Hectolitro
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IR	Infrarrojo/a
kg	Kilogramo(s)
L	Litro(s)
lb	Libra(s)

$\mu\text{m}$	Micrómetro(s)
M	Molar
mg	Miligramo
min	Minuto(s)
mL	Mililitro(s)
mm	Milímetro(s)
mM	Milimolar
$\eta\text{g}$	Nanogramo(s)
N	Normal
$\text{N}_2$	Nitrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
$\text{O}_2$	Oxígeno
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
OMS	Organización Mundial de la Salud
p/p	Peso/ peso
pH	Potencial hidrógeno
plg	Pulgada(s)
PNE	Proceso de nixtamalización ecológico
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo(s)
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
V	Volt(s)
v/p	Volumen/peso
v/v	Volumen/volumen
W	Watts
$\Delta a$	Diferencias absolutas del valor a
$\Delta b$	Diferencias absolutas del valor b
$\Delta E$	Diferencia total de color
$\Delta L$	Diferencias absolutas del valor L

## RESUMEN

El proceso de la nixtamalización se ha transmitido de generación en generación, y aún se utiliza como en los tiempos prehispánicos, sin grandes cambios en las etapas y condiciones de procesamiento. Es por esta razón, que en la presente investigación se evaluó el efecto de dos procesos de nixtamalización (método tradicional o por cocción a gas y método por calentamiento infrarrojo) sobre las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas, composicionales, nutrimentales y viscoamilográficas de las tortillas. Las tortillas obtenidas con ambos métodos de nixtamalización, presentaron características de calidad adecuadas para su consumo, sin embargo, las tortillas obtenidas con la nixtamalización por infrarrojo, retuvieron 25.1% más de lípidos, así como 72.3% más de contenido de triptófano en comparación con las tortillas obtenidas por el método tradicional de nixtamalización. La composición del nejayote generado con el método tradicional e infrarrojo, indicó que la pérdida de sólidos del maíz fue de 3.08% y de 1.82%, respectivamente. En otras palabras, durante la nixtamalización por infrarrojo, se perdió 40.9% menos del contenido de sólidos del grano de maíz, en comparación con el nejayote proveniente del método tradicional de nixtamalización. Adicionalmente, las tortillas obtenidas con el método de nixtamalización por infrarrojo, presentaron el valor más bajo en la viscosidad de retrogradación. Con base en estos resultados, se puede concluir que se desarrolló un proceso novedoso de nixtamalización basado en la cocción por radiación infrarroja, el cual tiene la capacidad de producir tortillas con características fisicoquímicas, composicionales, nutrimentales, y viscoamilográficas mejoradas.

**Palabras clave:** maíz; procesos térmicos-alcálinos; tortillas; propiedades tecnológicas; propiedades nutrimentales.

## JUSTIFICACIÓN

En México, el mayor consumo de maíz es en forma de tortilla, alcanzando valores *per cápita* de hasta 70 kg anuales. Las propiedades organolépticas y de textura de las tortillas son esenciales, debido a que en México se prefiere el método tradicional de nixtamalización para la elaboración de las tortillas. Sin embargo, la nixtamalización tradicional conduce a la pérdida de algunos nutrientes incluyendo la grasa, la proteína, la fibra dietética, las vitaminas y los minerales. Debido a esto, la industria de la tortilla compromete la calidad al ofrecer productos con baja cantidad/calidad de proteína. Es por esta razón, que se hace necesario la búsqueda de métodos alternos, los cuales incorporando nuevas tecnologías como la radiación infrarroja (IR), sean menos severos durante el tratamiento del grano de maíz, pero igual de eficientes que los combustibles fósiles.

## INTRODUCCIÓN

En México el maíz ha sido y seguirá siendo el cultivo más importante, y esto radica en la contribución de este cereal a la alimentación humana. La tortilla es el alimento básico en la población de nuestro país; tradicionalmente, la elaboración de las tortillas se lleva a cabo una vez que el proceso térmico-alcalino llamado nixtamalización es concluido. Se sabe que el proceso tradicional de nixtamalización incrementa el valor nutricional de las proteínas del grano de maíz, promueve la incorporación de iones de calcio, y mejora la biodisponibilidad de la niacina. Desafortunadamente, este proceso también conduce a la pérdida de algunos nutrientes como los lípidos, las proteínas, los aminoácidos, la fibra dietética, las vitaminas y los minerales. Debido a esto, se han llevado a cabo diversos estudios con relación a la fortificación de las tortillas. En estas investigaciones, se ha incrementado el valor nutrimental añadiendo: soya, harina de soya desgrasada, ajonjolí, sorgo, semilla de algodón, maíz germinado, residuo de leche de soya, así como la incorporación directa de lisina y triptófano. Sin embargo, estas estrategias han demostrado ser costosas y/o poco prácticas, debido a los cambios en las propiedades fisicoquímicas, texturales, y sensoriales de las tortillas enriquecidas. Durante las últimas cuatro décadas, se han propuesto tecnologías alternas para la elaboración de harinas de maíz nixtamalizado, incluyendo: secado en tambor, tratamiento de micronización o calor seco, microondas, calentamiento óhmico, y extrusión. Sin embargo, los productos elaborados con estos métodos no son comparables en calidad a los obtenidos con el proceso tradicional de nixtamalización. Para eliminar la desventaja antes mencionada, se hace necesario investigar métodos alternos o modificaciones al proceso tradicional de nixtamalización. Recientemente, el uso de la radiación IR en la industria de los alimentos se ha incrementado, debido a que es un método efectivo, práctico, y económico de calentamiento, aunado a la superioridad en términos de la calidad de los productos elaborados con esta tecnología en comparación con los procesados con el calentamiento convencional. Consecuentemente, el presente trabajo de tesis fue conducido para evaluar las propiedades fisicoquímicas, de calidad tecnológica, composicionales, nutrimentales, y viscoamilográficas de las tortillas de maíz elaboradas con un método de nixtamalización por cocción con radiación IR, y comparar estas propiedades con las de las tortillas producidas con el método tradicional de nixtamalización.

## ANTECEDENTES

### 1. Generalidades del maíz

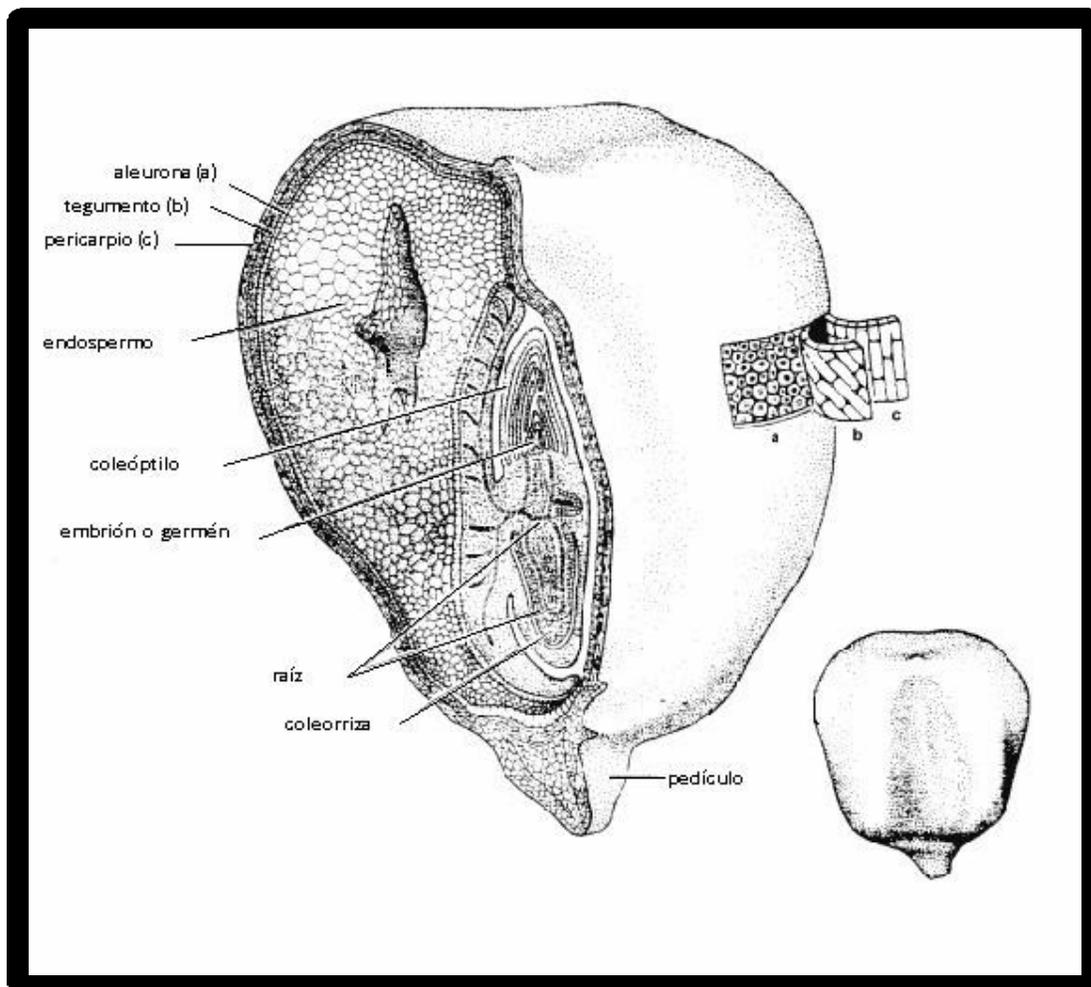
#### 1.1. Descripción y origen del maíz

El maíz (*Zea mays* L.), es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Es uno de los tres granos básicos que alimentan a la humanidad, tuvo su origen y diversificación inicial en las montañas y valles de México, por medio de la intervención de los antiguos pobladores de este territorio en un proceso coevolutivo que condujo a la formación de una de las plantas cultivadas de mayor diversidad genética, cuya riqueza aún se mantiene en este país, principalmente por los productores del medio rural. En la actualidad podemos tener claro que los antiguos habitantes del territorio mexicano, en el proceso de domesticación aprovecharon el potencial genético de una especie de gramínea ramificada, el teosinte, detonando una de las más impresionantes expresiones de diversidad al interior de un cultivo, generando a su vez diversos escenarios agrícolas y culturales tanto en México como en gran parte de América. La antigüedad de la evidencia arqueológica en su conjunto y la presencia de los parientes silvestres más cercanos al maíz en el territorio mexicano, han convencido a la comunidad científica interesada en el tema de que México es el centro de origen de este cereal (Kato *et al.*, 2009).

Botánicamente, el maíz pertenece a la familia de las gramíneas y es una planta anual alta dotada de un amplio sistema radicular fibroso. Se trata de una especie que se reproduce por polinización cruzada y la flor femenina (elote, mazorca, choclo, o espiga) y la masculina (espiguilla) se localizan en distintos lugares de la planta (FAO, 1993). El maíz tiene una gran variabilidad en el color del grano, la textura, la composición, y la apariencia. Puede ser clasificado en distintos tipos según: a) la constitución del endospermo y del grano; b) el color del grano; c) el ambiente en el que es cultivado; d) la madurez; y e) su uso. Los tipos de maíz más importantes son duro, dentado, reventón, dulce, harinoso, ceroso, y tunicado. Económicamente, los tipos más importantes de maíz cultivados para grano o forraje y ensilaje caen dentro de las tres categorías más importantes de duro, dentado, y harinoso.

## 1.2. Estructura del grano de maíz

El grano o fruto del maíz es un cariopse. La pared del ovario o pericarpio está fundida con la cubierta de la semilla o testa y ambas están combinadas conjuntamente para conformar la pared del fruto. El fruto maduro consiste de tres partes principales: la pared, el embrión diploide, y el endospermo triploide. La parte más externa del endospermo en contacto con la pared de la semilla es la capa de aleurona. En la Figura 1 se muestra un corte longitudinal que permite ver la estructura del grano de maíz.



FAO, 1993

Figura 1. Corte longitudinal del grano de maíz.

Al endospermo, la parte de mayor tamaño, corresponde cerca del 83% del peso del grano, en tanto que el germen equivale por término medio al 11% y el pericarpio al 5%. El resto está constituido por la pilorriza, estructura cónica que junto con el pedicelo une el grano a la espiga. En la Tabla 1 se muestra la distribución ponderal de las principales secciones del grano de maíz

**Tabla 1. Porcentaje de distribución ponderal de las partes principales del grano de maíz**

<b>Estructura</b>	<b>%</b>
Pericarpio	5-6
Aleurona	2-3
Endospermo	80-85
Germen	10-12

Fuente: FAO, 1993.

### **1.3. Composición del grano de maíz**

Las partes principales del grano de maíz difieren considerablemente en su composición química (Burge y Duensing, 1989). En la Tabla 2 se muestra la composición química proximal de los granos de maíz.

**Tabla 2. Composición química proximal de las partes principales del grano de maíz (%)**

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

Fuente: Watson, 1987

### **1.3.1. Almidón**

El componente químico principal del grano de maíz es el almidón, al que corresponde hasta el 73% del peso del grano. Otros hidratos de carbono presentes son azúcares sencillos en forma de glucosa, sacarosa, y fructosa, en cantidades que varían del 1% al 3% del peso del grano. El almidón está formado por dos polímeros de glucosa: la amilosa y la amilopectina. La amilosa es una molécula esencialmente lineal de unidades de glucosa, que constituye hasta el 30% del almidón. El polímero amilopectina también consiste de unidades de glucosa, pero en forma ramificada y constituye hasta el 75% del almidón. La composición del almidón viene determinada genéticamente. En el maíz común, ya sea con un endospermo de tipo dentado o córneo, el contenido de amilosa y amilopectina del almidón es tal como se ha descrito anteriormente, pero el gen que produce maíz ceroso contiene un almidón formado mayoritariamente por amilopectina (Boyer y Shannon, 1987).

### **1.3.2. Proteína**

Después del almidón, las proteínas constituyen el siguiente componente químico del grano por orden de importancia. Las proteínas constituyen aproximadamente el 10.3% del grano integral y se encuentran principalmente en el endospermo del grano de maíz (Inglett, 1970). La distribución proteica general en el grano de maíz es de 5% de albúminas y globulinas, 44% de prolaminas, y 28% de glutelinas. La principal proteína en el maíz es una prolamina denominada zeína. En las proteínas del grano de maíz, el primero y el segundo aminoácido limitante son el triptófano y la lisina, respectivamente. En contraparte, la proteína del grano de maíz presenta alto contenido de leucina (Hoseney, 1986). En la Tabla 3 se muestra el contenido de aminoácidos esenciales de las proteínas del germen y el endospermo del grano de maíz.

**Tabla 3. Contenido de aminoácidos esenciales de las proteínas del germen y el endospermo del maíz**

Aminoácido	Endospermo <sup>a</sup>		Germen <sup>b</sup>		Modelo FAO/OMS
	mg	mg/g N	mg	mg/g N	
Triptófano	48	38	144	62	60
Treonina	315	249	622	268	250
Isoleucina	365	289	578	249	250
Leucina	1 024	810	1 030	444	440
Lisina	228	180	791	341	340
Total azufrados	249	197	362	156	220
Fenilalanina	359	284	483	208	380
Tirosina	483	382	343	148	380
Valina	403	319	789	340	310

<sup>a</sup>1.26% de N.; <sup>b</sup>2.32% de N

*Fuente:* Orr y Walt, 1957

Las proteínas del germen proporcionan una cantidad relativamente alta de determinados aminoácidos, aunque no suficiente para elevar la calidad de las proteínas de todo el grano. El germen aporta pequeñas cantidades de lisina y de triptófano, los dos aminoácidos esenciales limitantes en las proteínas del maíz. Las proteínas del endospermo tienen un bajo contenido de lisina y triptófano, al igual que las proteínas de todo el grano.

### 1.3.3. Lípidos

Estos compuestos representan alrededor del 4.8% del peso total del grano. El germen es la parte del grano donde se localiza la mayor parte de los lípidos, constituyendo aproximadamente el 80%. Los lípidos se encuentran principalmente como triglicéridos de ácidos grasos donde el ácido linoleico es el principal componente con un 59% de los ácidos grasos totales (Inglett, 1970).

### **1.3.4. Azúcares libres**

Los azúcares libres en el grano de maíz constituyen del 1.0% al 3.0%, siendo la sacarosa el azúcar de más alta proporción (FAO, 1993).

## **1.4. Producción e importancia del grano de maíz en México**

### **1.4.1. Producción de maíz**

El maíz es el principal cultivo agrícola de nuestro país. El volumen de la producción y superficie destinada al cultivo de maíz representa la mitad de la tierra cultivable en el país y dependen directamente de él cerca de la cuarta parte de la población mexicana (Iturriaga, 1987). México tiene una población estimada de 118.3 millones de habitantes con el consumo *per capita* más alto en el mundo (INEGI, 2013). En el año 2011 tuvo una producción de maíz de más de 27.27 millones de toneladas métricas, destinándose 17.64 millones para consumo humano, 9.61 millones para alimentación animal y usos industriales (SIAP, 2013). A pesar de esta producción, los requerimientos siempre serán mayores, por lo que se tendrá que importar maíz.

### **1.4.2. Consumo de maíz**

En México el maíz se consume de diversas formas: en grano (pozole), tostado y molido (pinole y atoles), como masa (tamales), fermentados (pozol) y nixtamalizado en diversas formas que se hacen utilizando como base la tortilla (tacos, sopes, enchiladas, huaraches, tostadas, botanas, entre otros). Tradicionalmente, el mayor consumo de este grano se hace en forma de tortilla, la cual se acompaña con otros alimentos (por ejemplo: frijoles, vegetales, chiles, quesos, y carnes). Con el consumo del maíz, la población mexicana satisface hasta un 70% de sus necesidades energéticas, un 50% de las proteínas, y un 37% del calcio total cuando se consume en forma de tortilla (Flores-Farías *et al.*, 2000).

Comparativamente, el consumo de maíz en nuestro país es 23 veces más que el de arroz, 9 veces más que el de frijol y 3 más que el trigo (Iturriaga, 1987). Se estima que la tortilla

es consumida por el 94% de la población mexicana (Rubio, 1989), teniendo un consumo anual *per cápita* de 70 kg (GIMSA, 2012).

## **2. La tortilla de maíz**

Históricamente, la tortilla de maíz ha sido la base del desarrollo del pueblo mexicano, es uno de los alimentos que ya se incluye en la dieta diaria de todos los estratos sociales de México, por lo menos una vez por semana se consume, ya sea en forma directa como tortilla, con los tradicionales tacos o en alguna de sus transformaciones, como chilaquiles, enchiladas, tostadas, totopos, nachos e incluso en forma de botanas como frituras.

### **2.1. Proceso de elaboración de la tortilla por el método tradicional**

#### **2.1.1. Nixtamalización**

Del náhuatl *nixtli*, cenizas, y *tamalli*, masa de maíz cocido, el proceso de la nixtamalización se ha transmitido de generación en generación en Mesoamérica, y todavía se utiliza como en tiempos prehispánicos. Se inicia con la adición de dos partes de una solución de cal aproximadamente al 1% a una porción de maíz. Esta preparación se cuece de 50 a 90 min a una temperatura de 85-100 °C, y se deja remojando en el agua de cocción, conocida como nejayote, por 14-18 h. Posterior al remojo, se retira y desecha el nejayote, y el maíz se lava dos o tres veces con agua, para retirar el excedente de cal y de esta manera se obtiene el llamado maíz nixtamalizado o nixtamal, que llega a tener hasta un 45% de humedad (Paredes-López, 2008).

El nejayote es una de las aguas de desecho más difíciles de tratar debido a que tiene un alto pH (10 a 14), contiene materia orgánica soluble e insoluble (aproximadamente 5%), restos de cal (80% de la cal utilizada originalmente durante el proceso de la nixtamalización), y una demanda bioquímica (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) cercana a 2.7 a 8.1 g O<sub>2</sub>/L y 10 a 30 g/L, respectivamente (Jackson *et al.*, 1988; Pedroza-Islas y Duran de Bazúa, 1990; Velazco-Martínez *et al.*, 1997; Salmerón-Alcocer *et al.*, 2003).

### **2.1.2. Molienda del nixtamal**

La molienda se ha realizado de diferentes formas: utilizando instrumentos sencillos como el metate de piedra o el molino de mano, hasta equipos mecánico-eléctricos como el molino de piedras (Rodríguez-García *et al.*, 2008). Es importante indicar que el proceso de molienda requiere la adición de agua y que la masa llega a tener un contenido de humedad entre 48–55%.

### **2.1.3. Elaboración de las tortillas**

La tortilla tiene una forma de disco aplanado, la cual puede formarse manualmente palmeándola o con prensas manuales o tortilladoras automáticas, las cuales, además de formar la tortilla, la cuecen en un proceso continuo. Para una tortilla común se necesitan aproximadamente de 28 a 30 g de masa, con esta cantidad de masa se pueden troquelar tortillas con espesores de 1.5 a 2 mm y diámetros de 12 a 25 cm (Rodríguez-García *et al.*, 2008). La tortilla es cocida sobre una superficie metálica plana conocida como comal; una buena cocción hará que se sellen ambas caras, permitiendo que la tortilla infle una vez que el agua contenida en la masa llegue a su temperatura de evaporación. Una vez cocidas, las tortillas tradicionalmente se envuelven con una pequeña manta ó servilleta, para conservar su calor y su suavidad.

### **2.1.4. Almacenamiento de las tortillas**

El procesamiento y el almacenamiento de la tortilla de maíz, provocan cambios texturales los cuales ocurren fácilmente. Sin embargo, algunos cambios en la textura pueden ser reversibles cuando las tortillas son recalentadas. La refrigeración es la mejor manera de conservar las tortillas. Sin embargo, ésta no ha sido una práctica exitosa debido a que los consumidores las prefieren frescas (Téllez-Girón *et al.*, 1988). El almidón retrogradado y la pérdida de humedad son las razones más importantes que provocan la pérdida de la textura en las tortillas, generando principalmente el endurecimiento. Altas cantidades de

almidón y bajas cantidades de grasa en las tortillas son también responsables del rápido incremento en el endurecimiento (Campas-Baypoli *et al.*, 2002).

La calidad en una tortilla de maíz varía dentro de las primeras 24 h y muestra pequeños cambios que perjudican la vida de anaquel (Limanond *et al.*, 2001). Las tortillas almacenadas son identificadas por un parcial decremento en la rolabilidad, y un gradual incremento en la firmeza (Friend *et al.*, 1992). El incremento en la firmeza generalmente es usado para cuantificar el endurecimiento de las tortillas de maíz (Limanond *et al.*, 2001).

## **2.2. Cambios importantes durante la elaboración de las tortillas**

### **2.2.1. Transformación grano-masa**

Durante el proceso de nixtamalización se presentan diferentes cambios fisicoquímicos y estructurales en los diversos componentes del grano de maíz, los cuales han sido reportados por diferentes investigadores. El cocimiento alcalino y el reposo provocan una disolución parcial de la cutícula y otras capas del pericarpio (Paredes-López y Saharópulus-Paredes, 1982), el hinchamiento y debilitamiento de las paredes celulares y componentes de la fibra facilitan la eliminación del pericarpio (Gómez *et al.*, 1989), las células de aleurona permanecen intactas y quedan unidas en la periferia del endospermo (Paredes-López y Saharópulus-Paredes, 1982; Gómez *et al.*, 1989), la lámina media y las paredes celulares son parcialmente degradadas y solubilizadas (Gómez *et al.*, 1989), gran parte del tejido del germen se retiene durante la gelatinización, traduciendo en efectos positivos en la calidad proteica de los productos de masa (Paredes-López y Saharópulus-Paredes, 1982).

### **2.2.2. Transformación masa-tortilla**

Al moler los granos nixtamalizados, los componentes son liberados y al mezclarlos dan lugar a la masa, la cual está formada de fragmentos de germen, residuos de pericarpio y endospermo atrapados todos ellos por una mezcla aglutinante de gránulos de almidón

fundidos, una matriz proteica y lípidos emulsificados (Rooney y Serna-Saldivar, 1987; Serna-Saldivar *et al.*, 1990). La textura de la masa es crítica para la etapa de moldeo de las tortillas; una textura adecuada es cuando la masa es adhesiva a tal grado que se pega a los rodillos formadores, pero se logra despegar adecuadamente. En general, una masa recocida es una masa muy “pegajosa” y por el contrario, una masa poco cocida produce una masa poco cohesiva, inadecuada para formar tortillas (Ramírez-Wong *et al.*, 1993). Después de que la masa es preparada, se troquela y la tortilla obtenida se somete a cocimiento. La combinación de alta temperatura (260-302 °C) y la alta humedad de la tortilla (51-55%) complementan la gelatinización del almidón que queda en contacto con la superficie; sin embargo, ésta es incompleta debido al corto tiempo de cocimiento, el cual va hasta los 90 s (Serna-Saldivar *et al.*, 1990). En general, los cambios que se presentan al cocer una masa para elaborar las tortillas son: complemento de la gelatinización, disminución del índice de solubilidad del almidón, y disminución de la viscosidad (Gómez *et al.*, 1992).

### **2.3. Procesos alternos de nixtamalización**

Las primeras investigaciones científicas sobre los aspectos fisicoquímicos y nutricionales acerca de la tortilla de maíz se iniciaron en los años 50's, cuando también se efectuaron varios esfuerzos para mejorar el proceso tradicional de nixtamalización. Sin embargo, estos cubrieron aspectos básicos del proceso ya comercial, los cuales incluían disminuir las relaciones de agua-maíz, la cantidad de cal, la temperatura y el tiempo de cocimiento y reposo, pero aun sin considerar cambios significativos al método tradicional de nixtamalización (Vaqueiro y Reyes, 1986). A la fecha, se han realizado investigaciones sobre procesos alternos para la elaboración de las tortillas (sin llevarlo a la práctica, sobre todo a escala industrial), dentro de los cuales se pueden mencionar:

#### **2.3.1. Proceso de nixtamalización ecológico**

En la búsqueda incesante de nuevas técnicas de nixtamalización que eliminen la producción de nejayote, reduzcan los costos de producción y los tiempos de cocción y de

reposo, así como la mejora de la calidad del producto terminado, entre otros, se desarrolló en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV) un proceso alternativo de nixtamalización denominado ecológico (PNE). En dicho proceso, se utiliza 1 kg de grano integral; el cual es molido empleando un molino Pulvex equipado con una malla con apertura de 0.8 mm, posteriormente se mezcla con 0.8 L de agua en ebullición y 3 g de cal, y finalmente se deja reposar por 2 h a temperatura ambiente ( $22\pm 1$  °C). El nixtamal así preparado se muele para la obtención de la masa y la elaboración de las tortillas (Méndez-Albores *et al.*, 2004a).

### **2.3.2. Proceso de nixtamalización por extrusión**

Otra de las tecnologías para la elaboración de masa fresca es la extrusión. En general, la técnica se basa en el uso de un tornillo sin fin cubierto por un tubo en cuyo exterior puede regularse la temperatura según las necesidades. El tornillo transporta el material (granular o fluido), y pasa entre los álabes del tornillo y el tubo envolvente. El material ya deformado, sale por el extremo opuesto a través de una boquilla que le confiere la forma del dado. Con esta tecnología, se ha logrado producir masa fresca, alimentando una mezcla de maíz molido integral, acondicionada con agua y cal. Las condiciones reportadas para este proceso fueron: velocidad de tornillo de 25 rpm, temperatura del extrusor 80 °C y con un tiempo de residencia de 1.3 min (Arámbula-Villa *et al.*, 2000). Las masas procesadas con el método antes descrito, presentaron una estructura densa y una buena retención de agua y baja velocidad de deshidratación; características que hicieron que el producto fuese aceptable al consumidor.

### **2.3.3. Proceso de nixtamalización por calentamiento óhmico**

El calentamiento óhmico es originado por el efecto Joule, donde si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren los electrones con los átomos del material conductor, ocasionando una elevación en la temperatura. Basándose en este principio Contreras-Jiménez (2009) desarrolló un proceso para nixtamalizar harinas de maíz.

El calentamiento óhmico es una tecnología relativamente nueva y prometedora. La principal ventaja que se ha observado es que es un procedimiento rápido, el cual permite que el alimento conserve su calidad original; sin embargo, la cantidad de material procesado con este mecanismo es bastante limitada.

#### **2.3.4. Proceso de nixtamalización con pre-remojo.**

Este proceso consiste en dejar reposar el grano de maíz en una solución de cal durante 12 h a temperatura ambiente; una vez concluido este tiempo se procede de la misma forma que en el proceso de nixtamalización tradicional. La ventaja principal es que se reduce, en gran medida el tiempo de cocimiento del grano de maíz, el cual se encuentra en el rango de 80 a 50 min ahorrando en consumo de energía hasta 40% en comparación con el método tradicional (Norad *et al.*, 1986).

#### **2.3.5. Proceso de nixtamalización tradicional con cocción a presión**

La aplicación de altas presiones para el cocimiento del maíz ha sido estudiada como una posible alternativa para disminuir el tiempo empleado durante la nixtamalización tradicional. La nixtamalización se lleva a cabo en un recipiente a presiones de 5–25 lb/plg<sup>2</sup> en un tiempo aproximado de 20 min; posteriormente el grano cocido se lava y se enfría hasta 77 °C y se deja en reposo por 60 min con mezclado cada 10 min. Finalmente el grano es secado y molido; la harina obtenida es usada para la preparación de la masa (Bedolla y Rooney, 1982).

#### **2.3.6. Proceso empleando cámara de vapor**

El cocimiento de la harina de maíz se realiza dentro de una cámara de vapor con un ventilador en la parte inferior, para homogenizar tanto el aire como la harina de maíz previamente acondicionada con cal y agua, la temperatura se sitúa en un rango de 80–120 °C la cual se eleva gradualmente hasta alcanzar el punto de ebullición, posteriormente la

harina se transfiere a una cámara de enfriamiento, para finalmente ser molida a menores tamaños de partícula.

### **2.3.7. Proceso dieléctrico de nixtamalización**

Otro método que ha sido investigado para la elaboración de masa, es el dieléctrico. Este sistema está integrado por un generador de función, un amplificador, un convertidor de corriente alterna (CA) a corriente directa (CD), un termopar (medidor de temperatura) y una interfaz compatible con una computadora. Inicialmente 100 g de maíz integral son macerados durante 20 min en una suspensión de agua y cal (0.1%); y posteriormente es aplicado el tratamiento dieléctrico, el cual consiste en hacer pasar un voltaje de 100 V empleando dos electrodos de cobre-níquel, por un tiempo de 10 a 15 min. Finalmente el maíz es molido y deshidratado a 50 °C en estufa de circulación de aire para obtener la harina nixtamalizada (Gaytán-Martínez *et al.*, 2000). El proceso desarrollado ofrece potencial para producir frituras de maíz con menor uso de agua, reducción de tiempos de proceso y mayores rendimientos debido al uso integral del grano de maíz; sin embargo, al igual que el proceso de nixtamalización por calentamiento óhmico, tiene la limitante respecto a la cantidad de muestra procesada.

### **2.3.8. Proceso de nixtamalización selectiva**

En este proceso se separaran los principales componentes del grano de maíz (pericarpio, germen, endospermo, y pedicelo). Las fracciones de pericarpio son cocidas con agua y cal y las fracciones de germen-endospermo son maceradas con agua a temperatura ambiente o calentadas, en ambos casos con cal y agua. Las fracciones obtenidas se muelen separadamente y posteriormente se mezclan para obtener la masa (Martínez-Montes *et al.*, 2001).

### **2.3.9. Proceso de nixtamalización con microondas (PNM)**

Recientemente, en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) se desarrolló un proceso de nixtamalización empleando cocción con microondas. En este proceso se elabora una mezcla de maíz integral (malla 5 mm), agua y  $\text{Ca(OH)}_2$  (en proporción 1:1:0.005, respectivamente), la cual se cuece en un horno de microondas a una potencia del 100% (1650 W) por espacio de 5.5 min. Posteriormente, el nixtamal así producido se le deja en reposo por espacio de 3 h, para luego someterlo a molienda para la elaboración de la masa y posteriormente tortillas (Pérez-Flores *et al.*, 2011). Este proceso está diseñado para obtener diferentes productos a partir de la harina integral de maíz, tales como masa fresca, tortilla, e incluso harina instantánea, con sólo modificar las variables de proceso involucradas. Al igual que con los métodos antes señalados, este proceso tiene la ventaja de no producir efluentes contaminantes, además de reducir los tiempos y costos de operación; todo esto aunado a la ventaja que ofrece este tipo de cocción respecto a la calidad nutricional y sensorial de los productos obtenidos.

En general, el calentamiento con microondas de los alimentos es causado por la fricción molecular de los dipolos eléctricos, bajo la oscilación de campos eléctricos de frecuencia específica. La alta absorción de energía por las moléculas de agua (las cuales son los componentes dipolares más abundantes de los alimentos), resultan en un calentamiento más uniforme (Mudgett, 1986).

### **3. Generalidades de la radiación infrarroja (IR)**

Existen, en la luz solar radiaciones invisibles al ojo humano que transportan el calor y que, de modo análogo a lo que ocurre con las visibles, son refractadas y dispersadas por un prisma; éstas son las radiaciones infrarrojas. Las radiaciones infrarrojas no existen sólo en el espectro solar, sino que son emitidas por todos los cuerpos calientes. Son las que producen la sensación de calor que se percibe al acercar la mano a una estufa o a un radiador encendido. Los rayos IR se propagan en el vacío y en línea recta. La velocidad de propagación es igual a la de la luz, y se han podido realizar con ellos todos los

experimentos ópticos de reflexión, refracción, y difracción. Puede decirse, por consiguiente, que la radiación IR, llamada también rayos caloríficos oscuros, son de naturaleza idéntica a la de la luz visible, de la que sólo difiere por la longitud de onda (Zhongli y Griffiths, 2010).

### **3.1. Calentamiento por IR**

Dentro del grupo de tecnologías térmicas se encuentra el calentamiento por IR. Esta tecnología permite la estabilización por calentamiento no óhmico, aportando ventajas como el calentamiento volumétrico (Morata-Barrado, 2010). El proceso de calentamiento por IR no es una nueva técnica, ha sido usada, de una forma u otra, desde hace 50 años. Sin embargo, hasta hace unas décadas ha sido utilizada como una fuente de calor radiante (Sakai y Hanzawa, 1994). La técnica de IR se basa en la interacción de radiación electromagnética de cierta longitud de onda con el alimento en el cual produce vibración o rotación de las moléculas, lo que supone disipación de energía térmica que permite el calentamiento. El IR es una radiación de baja penetración (0.78-1000 $\mu\text{m}$ ) que produce un efecto más superficial. La radiación IR produce una cierta vibración en los enlaces intra- e intermoleculares de las moléculas que forman parte de los alimentos, lo que supone fricción molecular y elevación de la temperatura. La capacidad de penetración de la radiación IR es baja, por lo tanto el calentamiento es superficial y luego el resto del alimento es calentado por conducción desde las superficies exteriores calientes (Morata-Barrado, 2010).

### **3.2. Principios del calentamiento por IR**

Las formas de transferencia de calor por medio de la radiación IR son tres:

- Conducción – requiere contacto físico entre un material caliente y uno frío.
- Convección – la convección toma lugar cuando un gas o líquido es calentado (por conducción), después el gas o líquido caliente se mueve a una zona de menor temperatura y cede su calor (por conducción).

- Radiación – no requiere contacto físico entre las zonas frías y calientes.

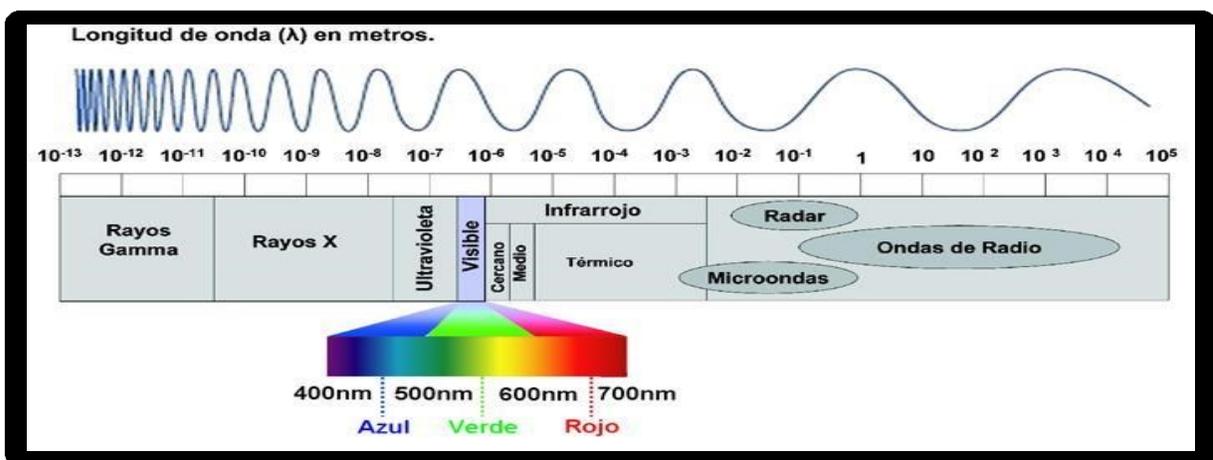
La radiación IR, también llamada radiación térmica, es la transferencia de energía entre dos objetos a diferentes temperaturas. La radiación IR es un fenómeno electromagnético, en forma de ondas (Zhongli y Griffiths, 2010). No toda la energía infrarroja es absorbida por un material, un cuerpo o una superficie. Parte de ella será reflejada o transmitida. La cantidad de energía que es absorbida, reflejada, o transmitida, varía con la longitud de onda de la radiación (que depende de la temperatura de radiación), con el material y con la superficie de este último.

### 3.3. Clasificación de la radiación IR

Se ha clasificado a la radiación IR de acuerdo a su longitud de onda en tres tipos, según Omori (1992):

- Infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) - 0.78 – 1.4  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo medio (MIR, por sus siglas en inglés) - 1.4 – 3  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés) - 3 – 1000  $\mu\text{m}$

En la Figura 2 se ilustra la parte del espectro electromagnético que corresponde a la radiación IR.



Jackson y Welch 1998

Figura 2. Representación esquemática del espectro electromagnético

### 3.4. Ventajas de la radiación IR

Algunas de las ventajas de la radiación IR son:

- Puede controlarse el rango de temperatura, desde valores muy bajos hasta valores elevados.
- Puesto que esta energía no requiere de un vehículo de transporte del calor como es el aire en los hornos por convección, los hornos de radiación IR son más efectivos por su rapidez y menor costo operacional.
- Los hornos IR pueden ser eléctricos o a gas, con llama o sin llama.
- La energía IR, tal como la luz es direccional y puede ser enfocada, reflejada, y absorbida por un cuerpo cercano.
- La radiación IR no depende del aire para su transmisión y es convertida en calor principalmente por absorción en la materia expuesta a la radiación. De hecho, el aire absorbe muy poca radiación IR.
- La radiación IR es eficiente debido a que la energía es transferida directamente de la fuente de calor al material.
- La radiación IR produce la muerte de los microorganismos contaminantes de los alimentos por la elevación de la temperatura. El mecanismo de resistencia microbiana al tratamiento por radiación IR es el mismo que en cualquier otro tipo de tratamiento térmico ya que con estas técnicas se produce la eliminación de los microorganismos por el efecto del incremento de la temperatura. Por tanto serán más resistentes los microorganismos termófilos y aquellos que presentan forma de resistencia (esporulados) a los tratamientos térmicos (Morata-Barrado, 2010).

### **3.5. Usos principales de la radiación IR**

Las radiación IR es ampliamente utilizada en la industria, desde la aplicación de recubrimientos hasta moldeado y procesamiento de plásticos, en la industria alimenticia es igualmente empleada.

Algunas de las investigaciones realizadas con radiación IR son: horneado de tortillas de trigo (Martínez-Bustos *et al.*, 1999), horneado de pan (Sumnu *et al.*, 2005), inactivación de esporas de *Bacillus subtilis* (Hamanaka *et al.*, 2006), esterilización de granos de trigo (Hamanaka *et al.*, 2007), descontaminación y pasteurización de chile en polvo, higo, y almendras (Staack *et al.*, 2008; Hamanaka *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2010), y en el control de microorganismos patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* Serovar *Typhimurium*, y *Listeria monocytogenes* (Ha *et al.*, 2012).

Tomando en consideración lo anteriormente señalado, es necesario evaluar el efecto que la radiación infrarroja tiene cuando es aplicada al proceso de la nixtamalización, y sobre todo conocer los atributos de calidad de las tortillas elaboradas con este tipo de proceso térmico.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Evaluar las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas, composicionales, nutrimentales, y viscoamilográficas de las tortillas de maíz producidas con la nixtamalización por IR y compararlas con las de las tortillas elaboradas con el método tradicional de nixtamalización.

### **4.2. Objetivos particulares**

1. Caracterizar el grano de maíz mediante pruebas físicas (largo, ancho, espesor, peso de 1000 granos, peso hectolítrico), fisicoquímicas (contenido de humedad, pH,

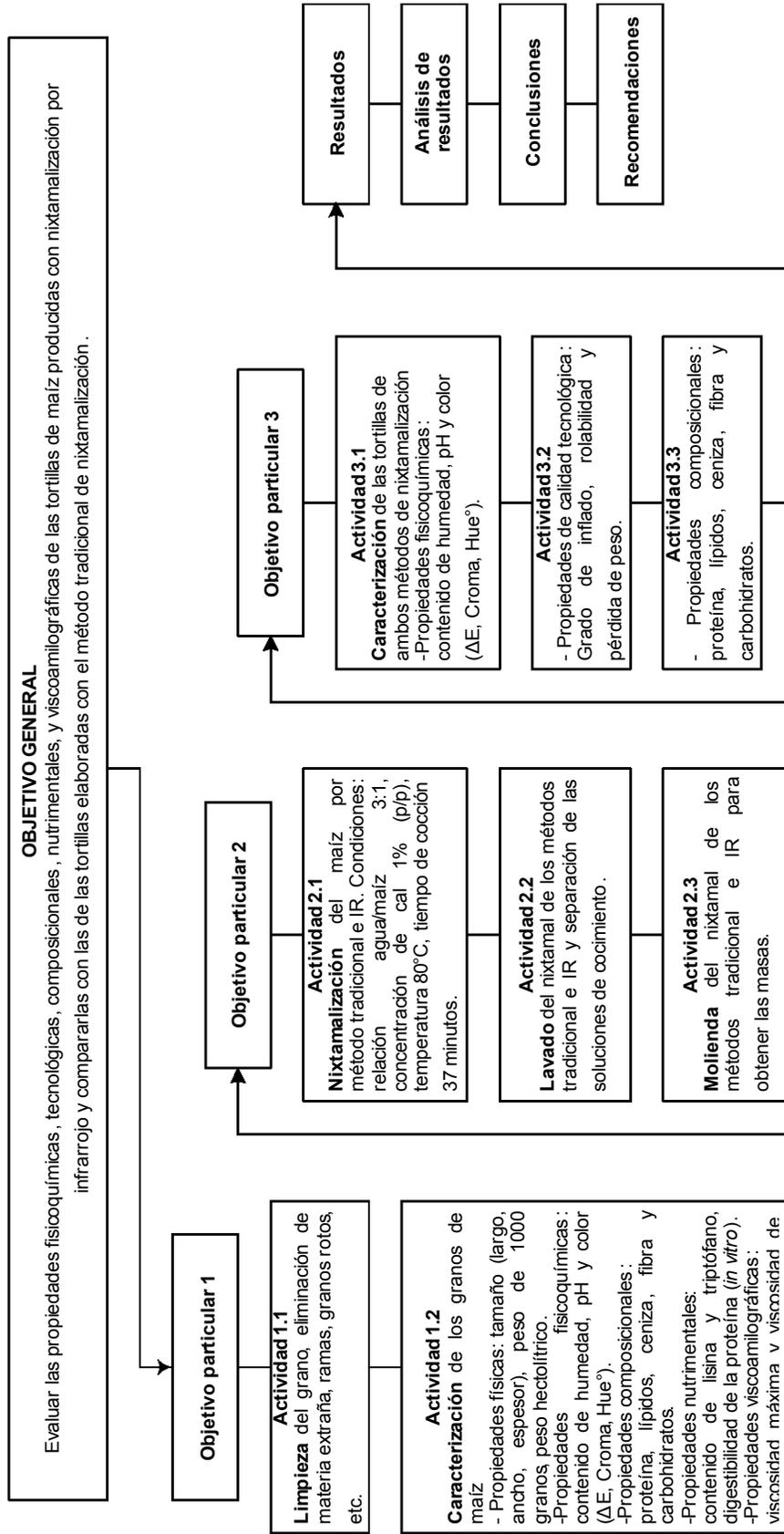
color), composicionales (proteína, lípidos, ceniza, fibra, carbohidratos), nutrimentales (contenido de lisina y triptófano, digestibilidad de la proteína (*in vitro*)), y viscoamilográficas (viscosidad aparente máxima y viscosidad de retrogradación) para conocer sus atributos de calidad nixtamalera.

2. Caracterizar las masas, así como las soluciones de cocimiento (nejayote) producidas con la nixtamalización tradicional e IR de los granos de maíz, en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas.

3. Determinar las propiedades fisicoquímicas (contenido de humedad, pH, color), tecnológicas (grado de inflado, rolabilidad, pérdida de peso), composicionales (proteína, lípidos, ceniza, fibra, carbohidratos), nutrimentales (contenido de lisina y triptófano, digestibilidad de la proteína (*in vitro*)), y viscoamilográficas (viscosidad aparente máxima y viscosidad de retrogradación) de las tortillas elaboradas con la nixtamalización por IR y comparar estos atributos con los de las tortillas elaboradas con el método tradicional de nixtamalización.

### **4.3. HIPÓTESIS**

El proceso de nixtamalización por IR producirá tortillas con propiedades fisicoquímicas, tecnológicas, composicionales, nutrimentales, y viscoamilográficas similares a las obtenidas con el método tradicional de nixtamalización.



#### 4.4. Cuadro metodológico

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se utilizó grano de maíz blanco con buenas características nixtamaleras, de la variedad AS-900, el cual fue proporcionado por Semillas Aspros de México S.A. de C.V. El maíz se almacenó en bolsas negras de polietileno a una temperatura de refrigeración de 4 °C, durante una semana, todo ello con el objetivo de evitar la proliferación de plagas y/o microorganismos.

### **5.1. Caracterización física del grano de maíz**

#### **5.1.1. Tamaño del grano**

Para determinar el tamaño del grano se midió el largo, el ancho, y el espesor del centro del grano. Se midieron 25 granos tomados al azar. Se utilizó un calibrador o vernier Digimatic, marca Mitutoyo Corp., con rango de medida de 0.01-150 mm. Los datos fueron reportados como valor promedio y error estándar de tres repeticiones.

#### **5.1.2. Peso de 1000 granos**

Se tomaron 1000 granos al azar y se pesaron en una balanza analítica Ohaus, con una capacidad de 0-210 g, y una precisión de  $\pm 0.0001$  g. Se realizaron cinco repeticiones de cada medición, se obtuvo la media y el error estándar de los datos.

#### **5.1.3. Peso hectolítrico**

Para la obtención de esta medida se siguió la técnica 55-10 de la AACC (2000). Se llenó de granos un recipiente de volumen conocido, pesándose en una balanza analítica Ohaus. El peso hectolítrico se obtuvo al dividir el peso de los granos entre el volumen del recipiente y relacionándolo a un volumen de 100 L. Se realizaron cinco repeticiones para la obtención de los datos, y se reportó la media y el error estándar.

## 5.2. Propiedades fisicoquímicas del grano de maíz

### 5.2.1. Contenido de humedad

Se procedió de acuerdo al método 44-19 de la AACC (2000). Se pesaron 4 g de muestra de maíz (grano entero) se colocaron en charolas de aluminio en una estufa con circulación de aire forzado (Blue M, electric company, USA) a 103 °C durante 72 h. Las pruebas se hicieron por triplicado.

### 5.2.2. pH

Para la determinación del pH se siguió el método 02-52 de la AACC (2000). Se preparó una suspensión con 10 g (b.s.) de harina de granos de maíz en 100 mL de agua desionizada a temperatura ambiente (23°C). La suspensión se agitó durante 30 min con un agitador magnético y posteriormente se dejaron en reposo durante 10 min. El pH fue determinado directamente en el sobrenadante utilizando un potenciómetro marca Conductronic PC 45 (Figura 3). Las determinaciones se realizaron por triplicado.



Figura 3. Potenciómetro Conductronic PC 45.

### 5.2.3. Color

Se utilizó un colorímetro (Minolta Cr-300) como se muestra en la Figura 4, el cual fue calibrado con una placa blanca de cerámica ( $L = 97.02$ ,  $a = 0.13$  y  $b = 1.77$ ). Se colocaron

aproximadamente 100 g de muestra en un recipiente de vidrio ancho y de baja profundidad (2 cm), las lecturas se hicieron en cuatro ángulos de aproximadamente 90° entre sí, y fueron realizadas por triplicado.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$^{\circ}\text{Hue} = \arctan \frac{b}{a}$$



Figura 4. Colorímetro Minolta Cr-300.

### 5.3. Procesamiento de las unidades experimentales

#### 5.3.1. Nixtamalización

Se sometieron 6 unidades experimentales de 1 kg de maíz (cada una) al proceso de nixtamalización; (3 unidades experimentales fueron procesadas con el método de nixtamalización tradicional, y 3 unidades experimentales fueron procesadas con el método de nixtamalización por IR). En ambos casos, se utilizó una relación agua-maíz de 3:1 (v/p). La concentración de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  fue del 1% con base en el peso del maíz. En ambos métodos de nixtamalización la temperatura y el tiempo de cocción fueron de 80 °C y 37 min, respectivamente. El nixtamal producido se mantuvo en reposo durante 18 h, a temperatura ambiente (24 °C).

En el caso del método tradicional, la nixtamalización se llevó a cabo empleando una olla como instrumento de cocción a fuego directo (cocción a gas); y para la nixtamalización por IR, el grano de maíz se sometió a cocción en un horno infrarrojo con sistema de convección (Thane International Inc., modelo AX-767MH, 1300W) el cual se ilustra en la Figura 5.

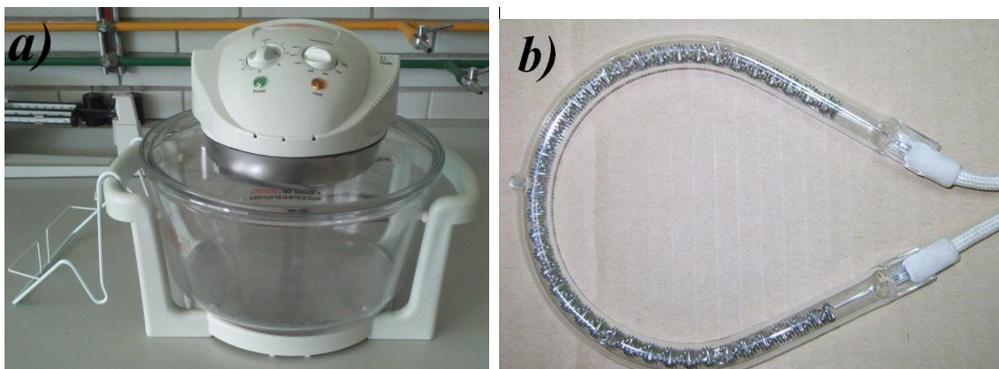


Figura 5. a) horno de radiación infrarroja con sistema de convección, b) tubo de cuarzo con resistencia emisora de radiación IR.

### 5.3.2. Molienda del nixtamal

El nixtamal de ambos métodos de nixtamalización, se molió en un molino de piedras (FUMASA, modelo MN-400, México) hasta obtener una masa con finura adecuada (determinada subjetivamente) para producir las tortillas. El molino y las piedras se ilustran en la Figura 6.

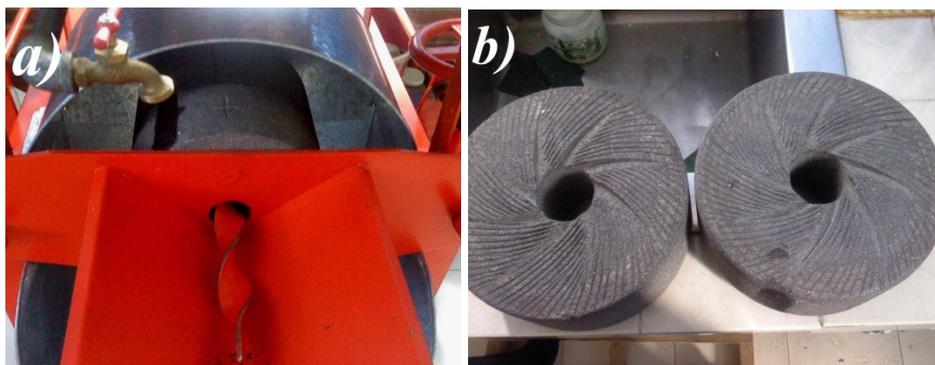


Figura 6. a) molino, y b) piedras utilizados para la elaboración de la masa de maíz

### **5.3.3. Troquelado de la masa**

Se prepararon testales de masa con un peso aproximado de 28 g, y se formaron discos con un espesor de 1.2 mm y un diámetro de 12.5 cm, utilizando una tortilladora de rodillos manual (Casa González, modelo TM-G, Monterrey, N.L. México).

### **5.3.4. Cocimiento de las tortillas**

La masa formateada se sometió a cocimiento utilizando un comal a una temperatura promedio  $270 \pm 5$  °C, la cual fue monitoreada con un termopar de contacto directo (FLUKE, modelo 179, U.S.A.). El tiempo de cocción para cada tortilla fue el siguiente: 17 s para la formación de la capa delgada de la tortilla, 55 s para la formación de la capa gruesa, y nuevamente 17 s para permitir el inflado, teniendo un tiempo total de 1.5 min (Pérez-Flores *et al.*, 2011).

Dos horas posterior a su elaboración, porciones de masa (500 g aproximadamente) y tortillas (n=15) de cada repetición y de cada tratamiento fueron deshidratadas en una estufa de circulación de aire forzado (Blue M, electric company, USA) a 40 °C durante 24 h, molidas y almacenadas en refrigeración a 4 °C en bolsas de polietileno para los análisis posteriores.

## **5.4. Propiedades de calidad tecnológica de las tortillas**

### **5.4.1. Grado de inflado**

Para evaluar esta variable se prepararon cinco tortillas y se observó el tamaño de la ampolla que presentó cada una al momento de la cocción (Figura 7); se le asignó un grado de 1 a la tortilla con un inflado entre 75–100%, de 2 a la tortilla con un inflado entre 25–75%, y de 3 a un inflado de 0–20 % (Méndez-Albores *et al.*, 2002).



Figura 7. Inflado característico de las tortillas de maíz; a) nixtamalización tradicional, b) nixtamalización por IR.

#### 5.4.2. Pérdida de peso durante la cocción

La pérdida de peso se determinó obteniendo el porcentaje en peso de material perdido durante la cocción, se pesó la tortilla cruda antes y después de la cocción. Se empleó la siguiente formula:

$$pp = \frac{(p. t. cruda - p. t. cocida)}{(p. t. cruda)} \times 100$$

p. t. cruda = peso de la tortilla cruda

p. t. cocida = peso de la tortilla cocida

#### 5.4.3. Rolabilidad

Se tomaron al azar cinco tortillas de cada repetición y de cada tratamiento después de 15 min de haber sido elaboradas (45 °C), se enrollaron manualmente en una varilla de vidrio con un diámetro de 2 cm de diámetro y se observó el grado de rompimiento. Se asignaron valores de 1 a las tortillas que no presentaron ruptura alguna, 2 para una ruptura de

aproximadamente el 25% del ancho de la tortilla, 3 a una ruptura del 50%, 4 a una ruptura del 75% y finalmente 5 a una ruptura total de la tortilla.

## **5.5. Propiedades fisicoquímicas de las masas y de las tortillas**

### **5.5.1. Contenido de humedad**

La determinación del contenido de humedad de la masa y de las tortillas se realizó de acuerdo al método 925.10 de la AOAC (2000), se utilizaron 2 g de muestra de cada producto, las cuales se sometieron a una temperatura de 103 °C en una estufa con circulación de aire forzado (Blue M, electric company, USA) durante 24 h. Las pruebas se realizaron por triplicado.

### **5.5.2. pH**

Para la determinación del pH se siguió el método 943.02 de la AOAC (2000). Se preparó una suspensión con 10 g (b.s.) de harina de masa y tortilla en 100 mL de agua desionizada a temperatura ambiente (23 °C). Las suspensiones se agitaron durante 30 min con un agitador magnético y posteriormente se dejaron durante 10 min en reposo. El pH fue determinado directamente en el sobrenadante utilizando un potenciómetro marca Conductronic PC 45. En el caso de las soluciones de cocimiento (nejayote), la lectura de pH se tomó directamente en 100 mL de estas. Las determinaciones se realizaron por triplicado.

### **5.5.3. Color**

Se utilizó un colorímetro (Minolta Cr-300), el cual fue calibrado con una placa blanca de cerámica ( $L = 97.02$ ,  $a = 0.13$  y  $b = 1.77$ ). Se tomaron tres tortillas al azar de cada repetición y de cada tratamiento y se colocaron en una superficie plana, las lecturas fueron tomadas directamente en cuatro ángulos de aproximadamente 90° entre sí de cada tortilla, las mediciones se hicieron por triplicado.

## 5.6. Propiedades composicionales de las tortillas

### 5.6.1. Proteína

La determinación de proteína se realizó empleando el método 960.52 (micro Kjeldahl) de la AOAC (2000), con mínimas modificaciones. El método consiste en la conversión de nitrógeno proteico a nitrógeno amoniacal, y mediante una titulación se determina el porcentaje de nitrógeno liberado. Para la prueba, se pesó 1 g de harina ( $W_m$ ) la cual se colocó en el digestor, adicionando 4 g de catalizador (3.5 g de sulfato de sodio y 0.5 g de sulfato cúprico). Posteriormente, se adicionaron 10 mL de ácido sulfúrico, y los tubos se calentaron hasta adquirir un color verdoso, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se transfirieron a un destilador, en el cual se colocaron 50 mL de una solución de hidróxido de sodio al 50%. Se colocaron los matraces para la recolección del destilado y se agregaron 25 mL de ácido bórico con indicador rojo de bromocresol y rojo de metilo. Finalmente, el destilado se tituló con una solución de ácido clorhídrico 0.1 N, se registró el volumen de ácido consumido en la titulación para realizar el cálculo con la siguiente ecuación, empleando un factor de 6.25.

$$\%proteína = \frac{V_{HCl} \times N_{HCl} \times 0.014 \times 6.25}{W_m} \times 100$$

$V_{HCl}$  = Volumen de HCl en mL consumidos en la titulación

$N_{HCl}$  = Normalidad del HCl

$W_m$  = Peso de la muestra

### 5.6.2. Lípidos

Se utilizó el método 920.39 de la AOAC (2000), el cual se basa en la extracción de lípidos debido a su naturaleza hidrofóbica con disolventes orgánicos como el éter etílico, el cloroformo o la acetona. Para la extracción, se colocó un matraz de bola limpio y desengrasado a peso constante ( $P_i$ ), posteriormente se ensambló en un sistema de extracción tipo Soxhlet conteniendo 200 mL de éter etílico. La muestra desecada y de peso conocido ( $P_m$ ) se colocó en un cartucho de filtro para extracción, el cual se acopló

al sistema; armado el equipo, se encendió la parrilla y se permitió la volatilización y condensación del éter a una velocidad constante, durante un lapso de 4 a 5 h hasta que el éter fuese incoloro. Pasado este tiempo, se recuperó el líquido y se eliminó el éter residual al colocar el matraz en una estufa (Blue M, electric company, USA) a 100 °C durante 30 min, posteriormente se dejó enfriar en un desecador y finalmente se pesó (Pf). Se realizaron los cálculos con base en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ lípidos} = \frac{Pf - Pi}{Pm} \times 100$$

### 5.6.3. Fibra

Se determinó empleando el método 962.09 de la AOAC (2000), el cual se basa en la pérdida de masa que corresponde a la incineración del residuo orgánico que queda después de la digestión con soluciones de ácido sulfúrico 0.128 M e hidróxido de sodio 0.313 M. Brevemente, la muestra que se llevó a digestión se filtró y se secó a 105 °C durante 5 h, se transfirió a un desecador y se determinó el peso. Posteriormente, la muestra fue incinerada a 525 °C durante 5 h, y se enfrió en el desecador hasta alcanzar un peso constante. El porcentaje de fibra se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ fibra} = \frac{W_{\text{residuo}} - W_{\text{cenizas}} - W_{\text{blanco}}}{W_m} \times 100$$

$W_{\text{residuo}}$  = Peso en mg del residuo de la filtración de fibra

$W_{\text{cenizas}}$  = Peso en mg de material inorgánico en la fibra

$W_{\text{blanco}}$  = Peso en mg  $W_{\text{residuo}}$  de las muestras usadas como blanco

$W_m$  = Peso de la muestra

#### 5.6.4. Cenizas

Se determinó de acuerdo al método 923.03 de la AOAC (2000), el cual se basa en la descomposición de la materia orgánica quedando solamente el material inorgánico. Para el análisis, se colocaron crisoles a peso constante dentro de un desecador ( $P_c$ ), en un crisol se pesaron 2.5 g de harina, las muestras se llevaron nuevamente a peso constante ( $P_{cm}$ ). Posteriormente, las muestras fueron incineradas con un mechero de Bunsen hasta lograr la carbonización, seguido de este proceso, las muestras fueron colocadas en una mufla para someterlas nuevamente a incineración a 550 °C durante 4 h, al término de ese tiempo, las muestras fueron revisadas para verificar si la materia orgánica había sido totalmente consumida (cenizas de color grisáceo). Finalmente, los crisoles fueron transferidos al desecador hasta su enfriamiento, para posteriormente registrar su peso ( $P_{cc}$ ). El porcentaje de cenizas se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%cenizas = \frac{P_{cc} - P_c}{P_{cm} - P_c} \times 100$$

### 5.7. Propiedades nutrimentales de las tortillas

#### 5.7.1. Lisina

El contenido de lisina se realizó utilizando el método descrito por López-Cervantes *et al.* (2006) mediante cromatografía líquida de alta resolución (Alliance<sup>®</sup> HPLC, Waters Associates, Milford, MA, USA), equipado con una columna Waters Nova-pak C18 de fase reversa (4 mm, 3.9 mm x 150 mm) a una temperatura de 38 °C. Muestras de 50 mg de harina se hidrolizaron a 110 °C con 10 mL de HCl 6 M durante 24 h. La muestra hidrolizada se filtró y el extracto se diluyó 200 veces con agua MilliQ. Una alícuota de 300 µL del extracto se secó y se derivatizó con la misma cantidad de 9-fluorenilmetil-cloroformiato (FMOC). Cantidades de muestra de 20 µL se inyectaron en el equipo HPLC y se eluyeron con una fase móvil de fosfato de amonio 30 mM (pH 6.5) en 15:85 (v/v) de metanol/agua, 15:85 (v/v) de metanol/agua, y 90:10 (v/v) acetonitrilo/agua, a una velocidad de flujo de 1.2 mL/min. El programa del gradiente utilizado fue similar al

reportado por López-Cervantes *et al.* (2006). La lisina fue detectada fluorométricamente y se identificó utilizando un detector de fluorescencia Waters modelo 2475, las longitudes de onda de excitación y emisión fueron 270 y 316 nm, respectivamente.

### **5.7.2. Triptófano**

El análisis de triptófano se realizó utilizando el método colorimétrico descrito por Nurit *et al.* (2009). Muestras de harina fueron desengrasadas con hexano en un extractor continuo tipo Soxhlet durante 6 h. Después de la evaporación del hexano, 80 mg de harina se llevaron a digestión utilizando 3 mL de solución de papaína 4 mg/mL en 0.165 M de acetato de sodio. Los tubos se incubaron a 65 °C durante 16 h, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, y se centrifugaron a 3600×g durante 10 min. Posteriormente, 1 mL del sobrenadante se transfirió cuidadosamente a un tubo limpio, y 3 mL del reactivo colorimétrico (ácido glioxílico 0.1 M en 7 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 1.8 mM de FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O + 30 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) fueron añadidos. Las muestras se agitaron en un vórtex (Scientific Industries Inc., USA) y posteriormente se incubaron a 65 °C durante 30 min. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de leer la densidad óptica a 560 nm en un espectrofotómetro UV-visible modelo DU-530 (Beckman-Coulter). Se construyeron curvas de calibración utilizando estándares de triptófano (Sigma, St. Louis, MO, EE.UU.).

### **5.7.3. Digestibilidad de la proteína *in vitro***

La digestibilidad de la proteína *in vitro* se realizó con el método 982.30G de la AOAC (2000). Se utilizó un sistema multienzimático, que consistió en una mezcla de tripsina pancreática porcina tipo IX, peptidasa intestinal porcina grado I,  $\alpha$ -quimiotripsina pancreática bovina tipo II, y proteasa bacteriana (Sigma, St. Louis, MO, EE.UU.). Se utilizó caseinato de sodio como proteína control (10 g en 200 mL de agua destilada y se ajustó a pH 8 con NaOH). Se utilizaron muestras de harina en agua destilada para preparar 10 mL de una suspensión acuosa de proteína (10 mg de N) con el pH ajustado a 8.0±0.03, las cuales fueron agitadas en un baño de agua a 37 °C durante 1 h. La solución

multienzimática se mantuvo en un baño de hielo y se ajustó a un pH de 8.0. Mientras se agitaban las muestras, se añadió 1 mL de la solución multienzimática a la suspensión de proteína y 10 min después de la adición, se añadió 1 mL de proteasa bacteriana y luego se transfirieron a un baño a una temperatura de 55 °C durante 9 min. Transcurridos 19 min de la reacción, los viales fueron trasladados de nuevo a un baño a 37 °C. El descenso rápido del pH se registró de forma automática en un periodo de 20 min utilizando un potenciómetro Modelo PC45 (Conductronic SA, Puebla, México). La digestibilidad *in vitro* de la proteína (DP) se calculó utilizando la ecuación:

$$DP (\%) = 234.84 - 22.56 (\text{valor de pH})$$

### **5.8. Propiedades viscoamilográficas**

La viscosidad relativa de las suspensiones de harinas de maíz y tortilla se determinó en un viscoanalizador RVA-4 (Newport Scientific, Sydney, Australia) como se ilustra en la Figura 8. Las tortillas se secaron en una estufa (Blue M, electric company, USA) a 40 °C durante 48 h, luego se molieron y tamizaron para proporcionar un material molido con un tamaño de partícula <250 μ (malla 60). Una muestra de 3.5 g con 14% de contenido de humedad se colocó en un cilindro de aluminio y se suspendió con 25.5 g de agua destilada. Una propela de plástico se colocó en la muestra, que después se fijó en el RVA, y el ciclo de calentamiento se activó a través de un bloque de cobre. El analizador utilizó un programa de tiempo-temperatura de la siguiente manera: se inició a 50 °C (1 min), se aumentó la temperatura a 92 °C a una velocidad de 5.6°C/min (7.5 min), se mantuvo 5 min a esa temperatura, y seguido se disminuyó la temperatura a 50 °C a la misma velocidad utilizada durante la fase de calentamiento, y permaneció a esa temperatura durante 2 min, con un tiempo total del prueba de 23 min. La velocidad de rotación de la propela fue de 860 rpm durante los primeros 10 s, y posteriormente 160 rpm durante el resto del análisis. De las curvas de viscosidad aparente, se registraron los valores del pico de viscosidad y la viscosidad de retrogradación, que es la diferencia entre la viscosidad al final y al inicio del período de enfriamiento.

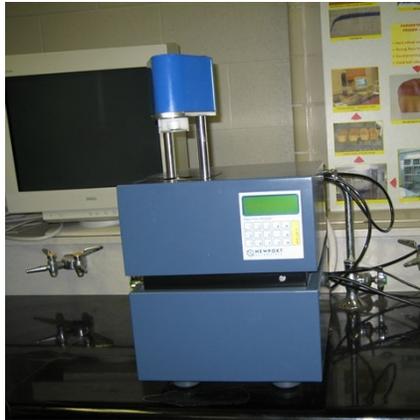


Figura 8. Viscoanalizador RVA-4.

### **5.9. Diseño experimental y análisis estadístico**

El experimento se analizó con base a un diseño completamente al azar. Las condiciones experimentales se realizaron con tres repeticiones. Los datos fueron evaluados mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y las comparaciones de medias se llevaron a cabo mediante la prueba de Dunnet, utilizando el Sistema de Análisis Estadístico (SAS ©, 1998). Se utilizó un valor de significancia de  $\alpha= 0.05$  para distinguir diferencias significativas entre los tratamientos.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Propiedades físicas de los granos de maíz

Las propiedades físicas del grano de maíz utilizado en el presente trabajo se muestran en la Tabla 4. El maíz empleado en la experimentación (AS-900) presentó un buen tamaño de grano (10.13 x 8.33 x 4.41 mm), característico de este tipo de maíz. Estas dimensiones son similares a las reportadas por Gutiérrez-Coronado *et al.* (2009) quienes caracterizaron granos de maíz amarillo, líneas moleculares, e híbridos de maíz presentando dimensiones promedio de 10.17 x 7.82 x 4.64 mm. Adicionalmente, el grano de maíz presentó un peso de 1000 granos de 283.40 g, atribuible a su tamaño, este valor es cercano al reportado por Gutiérrez-Uribe *et al.* (2010) quienes señalaron un peso de 1000 granos de 297.81 g para el grano experimental híbrido de maíz alto en carotenoides identificado como HCA y de 253.96 g para el grano de maíz blanco (híbrido) de alta calidad proteica. Uno de los parámetros de relevancia en la calidad comercial del grano de maíz es el peso hectolítrico o densidad volumétrica. Dicho parámetro, indica la relación de endospermo harinoso/córneo que presentan los granos. El valor obtenido en este parámetro para el grano de maíz AS-900 fue de 71.59 kg/hL, valor similar a los 70.70 kg/hL en maíz blanco CML-149 reportado por Gutiérrez-Coronado *et al.* (2009). Consecuentemente, el maíz utilizado (AS-900) presentó características físicas adecuadas para ser nixtamalizado.

**Tabla 4. Propiedades físicas del grano de maíz**

<b>Parámetro</b>	<b>Maíz AS-900</b>		
Tamaño (mm)			
Largo	10.13	±	0.28
Ancho	8.33	±	0.15
Espesor	4.41	±	0.14
Peso de 1000 granos (g)	283.40	±	3.64
Peso hectolítrico (kg/hL)	71.59	±	1.23

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

## 6.2. Propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz

El valor promedio de la humedad del grano fue de  $9.57 \pm 0.06\%$ , valor que se encuentra dentro del rango de 9.1-11.4% para distintas variedades de maíz y granos de maíz híbridos reportado por Méndez-Montevalvo *et al.* (2005). La Norma Oficial Mexicana (NMX-FF-034/1-SCFI-2002) establece que el contenido de humedad que permite el manejo, conservación, y almacenamiento del maíz, es por debajo del 14%; valor muy por arriba del 9.57% del grano utilizado en esta investigación. Sin embargo, el contenido de humedad del grano se encuentra dentro de los valores aceptables para su conservación. Por otra parte, el valor del pH para el grano de maíz AS-900 fue de 6.46 (Tabla 5). Este valor es similar al encontrado por Méndez-Albores *et al.* (2004b), quienes reportaron valores de pH de 6.34 para un grano de maíz comercial híbrido AS-910, el cual también fue proporcionado por Semillas Aspros de México. En lo que se refiere a color del grano de maíz, el valor promedio de la luminosidad (L) fue de 64.15, la diferencia total del color ( $\Delta E$ ) presentó un valor promedio de 37.93, el valor promedio del croma fue de 20.70 y finalmente, el valor del ángulo Hue fue de  $82.29^\circ$  (Tabla 5). Estos valores en los parámetros del color, son indicativos de que el grano de maíz (AS-900) presentó un color blanco, característico de los maíces comúnmente empleados por la industria de la masa y la tortilla.

**Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del grano de maíz**

<b>Parámetro</b>	<b>Maíz (AS-900)</b>
Contenido de humedad (%)	$9.57 \pm 0.06$
pH	$6.46 \pm 0.02$
Color	
L	$64.15 \pm 0.03$
$\Delta E$	$37.93 \pm 0.04$
Croma	$20.70 \pm 0.05$
Hue °	$82.29 \pm 0.13$

Valor promedio de al menos 3 repeticiones  $\pm$  error estándar.

### 6.3. Composición química de los granos de maíz

La composición química de los granos de maíz se muestra en la Tabla 6. El valor del contenido de proteína fue de 9.34%, dicho valor concuerda con lo reportado para el híbrido H-515, y las variedades V-538 y V-537, las cuales presentaron valores de 9.3, 9.3, y 9.4%, respectivamente (Méndez-Montealvo *et al.*; 2005). Méndez-Montealvo *et al.* (2005) encontraron, valores elevados en el contenido de grasa para diversas variedades de granos de maíz, reportando para el criollo Acatlán un valor de 7.0%, y para el híbrido simple (CML-269) un valor de 6.7%, los cuales concuerdan con el valor obtenido para el grano de maíz AS-900 (6.60%). Por otra parte, en cuanto al contenido de ceniza, se encontró un valor promedio de 1.81%, este valor es similar al reportado por Gutiérrez-Coronado *et al.* (2009) para el maíz blanco CML-186. Adicionalmente, el grano de maíz AS-900 presentó un contenido de 2.28% de fibra cruda, al respecto Figueroa-Cárdenas *et al.* (2001) reportaron un valor promedio de 2.23% para el contenido de fibra cruda de un grano de maíz comercial.

**Tabla 6. Composición química del grano de maíz**

<b>Componente</b>	<b>Maíz AS-900</b>
Proteína	9.34 ± 0.02
Grasa	6.60 ± 0.02
Cenizas	1.81 ± 0.05
Fibra cruda	2.28 ± 0.03
Carbohidratos*	79.97 ± 0.13

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

\*Determinado por diferencia.

Finalmente, en la Tabla 6, se muestra el porcentaje de carbohidratos presentes en el grano de maíz AS-900, el cual fue de 79.97%. Este valor es superior a lo reportado por Méndez-Montealvo *et al.* (2005), quienes presentaron un valor máximo de 77.69% para un grano híbrido; sin embargo, es inferior al reportado para la harina de maíz nixtamalizado marca Maseca, registrando valores de hasta 82.7% (Aguilar-Miranda *et al.*, 2002). Dicha variación, es probablemente debida al tipo de maíz analizado, teniendo en consideración que los valores en el contenido de carbohidratos son cálculos por diferencia matemática.

En resumen, las características químicas del grano AS-900, son similares a las de los granos de maíz utilizados por otros autores en diversas investigaciones relativas a la nixtamalización y a la elaboración de tortillas.

#### 6.4. Propiedades nutrimentales de los granos de maíz

En la Tabla 7, se muestran los valores del contenido de los aminoácidos lisina y triptófano de los granos de maíz. El contenido de lisina (33.95 g/kg de proteína) es similar al reportado por Sánchez *et al.* (2007), quienes compararon maíz de alta calidad proteica con maíces híbridos comunes o normales, encontrando un valor de 3.5% de lisina presente en la proteína de granos comunes de maíz. Para el caso del triptófano, la concentración de éste aminoácido fue de 6.81 g/kg de proteína, valor similar al reportado por Sánchez *et al.* (2007) quienes señalaron contenidos de 6 g/kg de proteína para granos de maíz. Por otra parte, la digestibilidad de la proteína (*in vitro*), fue de 75.24%, similar a lo reportado por Méndez-Albores *et al.* (2012), para grano de maíz de la misma variedad.

**Tabla 7. Propiedades nutrimentales de los granos de maíz**

<b>Parámetro</b>	<b>Maíz AS-900</b>
Lisina (g/kg proteína)	33.95 ± 0.27
Triptófano (g/kg proteína)	6.81 ± 0.09
Digestibilidad de la proteína <i>in vitro</i> (%)	75.24 ± 2.04

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

#### 6.5. Propiedades fisicoquímicas (contenido de humedad y pH) de la masa y el nejayote

En la Tabla 8 se muestra el contenido de humedad y el valor del pH de las masas de maíz y los nejayotes obtenidos con los métodos tradicional e IR. Para el caso de la masa producida con el método tradicional, se obtuvieron los valores más altos en el contenido de humedad y el pH, resultando valores de 57.57% y 8.47, respectivamente. Estos valores son estadísticamente diferentes a los obtenidos para la masa elaborada con el método por

IR. En este caso, los valores del contenido de humedad y pH fueron de 55.46% y 7.35 respectivamente. Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto (2010) obtuvieron masas con una humedad promedio de 56.45% al probar el efecto de la dureza de variedades de granos de maíz en el rendimiento y la calidad de las tortillas. Este valor del contenido de humedad se encuentra en el rango de las humedades de las masas de la presente investigación.

**Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas de la masa y el nejayote obtenidos de la nixtamalización tradicional e IR**

Parámetro	Nixtamalización	
	Tradicional	IR
<b>Masa</b>		
Contenido de humedad (%)	57.57 ± 0.08 <sup>a</sup>	55.46 ± 0.11 <sup>b</sup>
pH	8.47 ± 0.02 <sup>a</sup>	7.35 ± 0.03 <sup>b</sup>
<b>Nejayote</b>		
Sólidos orgánicos (%)	3.08 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.82 ± 0.01 <sup>b</sup>
pH	10.96 ± 0.02 <sup>a</sup>	11.45 ± 0.01 <sup>b</sup>

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

Valores con la misma letra en la misma fila entre columnas no son significativamente diferentes (Dunnet > 0.05).

En lo referente al contenido de sólidos presentes en el nejayote, para el método tradicional se tuvo un valor de 3.08%, estadísticamente diferente al 1.82% presente en el nejayote proveniente del método IR. Esta disminución en el contenido de sólidos corresponde a una reducción del 41%, en comparación con el método tradicional. Gutiérrez-Uribe *et al.* (2010) reportaron concentraciones de sólidos orgánicos de 2.52% a 7.91% en el nejayote obtenido de la cocción alcalina de diferentes tipos de granos de maíz. Adicionalmente, Valderrama-Bravo *et al.* (2012) registraron un valor en el contenido de sólidos de 2.28% para nejayote recolectado de molinos comerciales. Valores más bajos en el contenido de sólidos en el nejayote representan una ventaja, ya que el nejayote es una de las aguas residuales más difíciles de tratar debido al elevado contenido de sólidos orgánicos solubles e insolubles; consecuentemente, valores bajos en el contenido de sólidos facilitarán los tratamientos físico-mecánicos y biológicos, reduciendo de esta manera los costos en el tratamiento del nejayote. Por otro lado, en lo que respecta al pH del nejayote, se observaron diferencias estadísticas para este parámetro. Para el caso del nejayote proveniente del método tradicional, el valor del pH

fue de 10.96 y de 11.45 para el método IR. Algunos investigadores han reportado valores de pH de 12 para nejayote (Maya-Cortés *et al.*, 2010), mientras que otros autores han reportado valores de pH en el rango de 10.5 a 11.2 (Sahai *et al.*, 2000; Torres *et al.*, 2001). Bajo estas condiciones, el nejayote proveniente de la nixtamalización por IR podría ser reutilizado en el proceso de la nixtamalización, eliminando primeramente los sólidos mediante una filtración, y de esta manera aprovechar el pH tan elevado de la solución.

## **6.6. Propiedades fisicoquímicas de las tortillas**

En la Tabla 9 se muestra un comparativo de las propiedades fisicoquímicas de las tortillas obtenidas a través de los dos procesos de nixtamalización (tradicional e IR).

### **6.6.1. Contenido de humedad**

En lo que respecta al contenido de humedad de las tortillas, se encontró diferencia estadística significativa entre ambos procesos; las tortillas obtenidas por nixtamalización tradicional presentaron un contenido de humedad de 49.15%, mientras que, para las tortillas obtenidas con el método IR, el valor de la humedad fue de 45.03% (Tabla 9). Salinas-Moreno y Aguilar-Modesto (2010) reportaron un contenido de humedad de 45% en tortillas obtenidas con la nixtamalización de maíces con endospermo de dureza considerada como intermedia, y valores de 45.5% en tortillas elaboradas con maíces con endospermo suave. Adicionalmente, los resultados del contenido de humedad para las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización, son similares a los reportados por Cuevas-Martínez *et al.* (2010), quienes reportaron valores en el rango de 47.11 a 48.16% de contenido de humedad para tortillas elaboradas con maíz y mezclas de maíz-frijol. El contenido de humedad es un parámetro de importancia, y tiene influencia sobre la textura de la tortilla, valores bajos en el contenido de humedad producirán una tortilla poco flexible y rolable.

**Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización**

Parámetro	Nixtamalización	
	Tradicional	IR
Contenido de humedad (%)	49.15 ± 0.07 <sup>a</sup>	45.03 ± 0.13 <sup>b</sup>
pH	8.39 ± 0.03 <sup>a</sup>	7.59 ± 0.04 <sup>b</sup>
Color		
L	64.21 ± 0.92 <sup>a</sup>	65.02 ± 0.37 <sup>a</sup>
ΔE	37.96 ± 0.55 <sup>a</sup>	38.75 ± 0.26 <sup>a</sup>
Croma	20.87 ± 0.14 <sup>a</sup>	23.63 ± 0.19 <sup>b</sup>
Hue °	86.67 ± 0.73 <sup>a</sup>	86.33 ± 0.41 <sup>a</sup>

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

Valores con la misma letra en la misma fila entre columnas no son significativamente diferentes (Dunnet > 0.05).

### 6.6.2. pH

La Tabla 9, también muestra los valores de pH de las tortillas obtenidas por los métodos de nixtamalización tradicional y por IR. Los resultados señalan diferencia estadística significativa en el pH de las tortillas obtenidas por ambos procesos. A pesar de que se utilizó la misma concentración de hidróxido de calcio durante la nixtamalización (1% p/p), las tortillas producidas con la nixtamalización tradicional presentaron un valor de pH de 8.39, ligeramente por arriba del valor de pH obtenido para las tortillas elaboradas mediante la nixtamalización por IR, en las cuales el valor de pH fue de 7.59. Estos valores son similares a los de Martínez-Flores *et al.* (2004) quienes reportaron un valor de pH de 8.45 en tortillas de maíz producidas mediante extrusión a una concentración de 0.35% (p/p) de hidróxido de calcio. Por otra parte, los mismos autores reportaron valores de pH de 7.14 para tortillas elaboradas mediante extrusión con la adición de 0.3% de conservador (propionato de sodio). Martínez-Morquecho (2012) reportó valores de pH en el rango de 6.48 a 7.97 para tortillas de maíz elaboradas con diferentes concentraciones de hidróxido de calcio, producidas mediante nixtamalización por microondas. En los productos nixtamalizados, la concentración de hidróxido de calcio representa un factor importante, ya que esta puede afectar el color, el olor, el sabor, la textura y la vida de anaquel de los productos. Cuando el contenido de hidróxido de calcio no es suficiente para dar el sabor alcalino característico, el producto es rechazado por el consumidor; por

el contrario, si este compuesto se encuentra en exceso, el producto también será rechazado debido a su astringencia.

### 6.6.3. Color

Los resultados del análisis de color las tortillas se muestran en la Tabla 9. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en el caso de los valores de luminosidad (L), diferencia total de color ( $\Delta E$ ), y el ángulo Hue° (H) para las tortillas producidas por ambos métodos de nixtamalización. Los valores promedio para L,  $\Delta E$ , y Hue° fueron de 64.62, 38.36, y 86.5 respectivamente. Como se señaló anteriormente, la concentración de hidróxido de calcio utilizada durante la nixtamalización, es un factor determinante en el color de las tortillas. En esta investigación, únicamente se encontró diferencia estadística significativa en el valor del Croma; para las tortillas obtenidas con el proceso de nixtamalización tradicional, se obtuvo un valor de 20.87, valor por debajo del 23.63 que presentaron las tortillas obtenidas con la nixtamalización por IR. El Croma representa la “pureza” en el color; consecuentemente se observa que cuando los valores del pH en la tortilla son menores, es decir, que la retención de álcali en el grano de maíz es menor, el valor del Croma se incrementa. En general, valores más bajos en el pH de las tortillas corresponderán a valores más altos en el Croma, lo que implicará una tortilla menos amarillenta. Estos resultados del análisis del color, concuerdan con lo reportado por Méndez-Albores *et al.* (2012) para tortillas de maíz elaboradas con el proceso de nixtamalización por microondas con alcalinidad variable, quienes reportaron valores de L de 65.03 y de  $\Delta E$  de 38.22, para tortillas de maíz nixtamalizado con una concentración de 0.5% (p/p) de hidróxido de calcio. Por otra parte, Waliszewski *et al.* (2002) reportaron valores de Croma de 20.32 en tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado. Cuevas-Martínez *et al.* (2010) reportaron un valor de ángulo Hue° de 87.04 en tortillas elaboradas con una mezcla de 95-5% de maíz-fríjol blanco, la cual fue nixtamalizada con el método tradicional. Estos valores son consistentes con los encontrados en esta investigación.

La concentración de cal empleada durante la nixtamalización afecta el color de las tortillas, a pesar de que éstas sean producidas a partir de granos de maíz blanco, debido a

que la intensidad de color está directamente relacionada a los carotenoides, flavonoides, y sobre todo el pH. Sin embargo, el desarrollo del color durante el proceso térmico-alcalino es un proceso más complejo, considerando que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reacciona con los diferentes pigmentos de los granos de maíz e interfiere con algunas reacciones, tales como la caramelización y las reacciones de Maillard (Gómez, 1988).

## 6.7. Propiedades de calidad tecnológica de las tortillas

### 6.7.1. Grado de inflado

Todas las tortillas de cada tratamiento presentaron un valor de 3, el cual está relacionado con un inflado completo (75%-100% de la superficie de la tortilla), por lo tanto no se observó diferencia estadística significativa entre los tratamientos evaluados. Con relación a este parámetro, Ayala-Rodríguez *et al.* (2009) reportaron un grado de inflado del 100% en tortillas elaboradas con maíz transgénico nixtamalizado (Tabla 10).

**Tabla 10. Propiedades de calidad tecnológica de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización**

Parámetro	Nixtamalización	
	Tradicional	IR
Inflado (°)	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
Rolabilidad	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Pérdida de peso (%)	21.82 ± 0.03 <sup>a</sup>	17.49 ± 0.15 <sup>b</sup>

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

Valores con la misma letra en la misma fila entre columnas no son significativamente diferentes (Dunnett > 0.05).

Inflado. Escala 3 a un inflado entre 75–100%, de 2 entre 25–75%, y de 1 del 0–20 %.

Rolabilidad. Escala 1 no presentaron ruptura, 2 ruptura de aproximadamente el 25% del ancho de la tortilla, 3 ruptura del 50%, 4 ruptura del 75% y finalmente 5 a una ruptura total de la tortilla.

Un buen inflado se logra cuando las dos capas que conforman a la tortilla se forman de manera adecuada, estas capas producidas durante el proceso de cocción (capa delgada y capa gruesa), resultan impermeables, consecuentemente retienen el vapor de agua generado durante la cocción, lo que ocasiona que se infle la tortilla durante el calentamiento. Adicionalmente, el inflado permite la cocción interna de la tortilla debido

a la generación de vapor, por lo tanto un atributo de calidad de las tortillas es que éstas presenten un alto grado de inflado.

### **6.7.2. Rolabilidad**

Otro de los parámetros subjetivos de calidad evaluado en las tortillas de maíz producidas con ambos métodos de nixtamalización, es la rolabilidad (Tabla 10). Al igual que en el caso del inflado, ninguna tortilla presentó ruptura en su superficie, por lo tanto las tortillas evaluadas presentaron un valor de 1, que corresponde a que las tortillas no presentaron ruptura alguna en su superficie, al ser éstas enrolladas en una varilla de vidrio de 2 cm de diámetro. En este contexto, Figueroa-Cárdenas *et al.* (2001) reportaron valores similares para la rolabilidad en tortillas elaboradas con nixtamal y tortillas fortificadas con 0.15% de vitaminas y minerales. Este parámetro, se encuentra directamente relacionado con el contenido de humedad de las tortillas, por ende contenidos adecuados de humedad se relacionarán con un buen valor en la rolabilidad, y las tortillas se percibirán suaves y flexibles. Por el contrario, tortillas producidas con bajos contenidos de humedad, serán poco rolables y quebradizas.

### **6.7.3. Pérdida de peso en la cocción**

Este parámetro está directamente relacionado con la humedad de la masa, la temperatura y el tiempo de cocción de la tortilla en el comal. En la Tabla 10, se muestran los valores de la pérdida de peso de las tortillas elaboradas por ambos métodos de nixtamalización. Las tortillas elaboradas con la nixtamalización por IR presentaron el valor más bajo en la pérdida de peso (17.49%), estadísticamente diferente al valor de la pérdida de peso de las tortillas obtenidas por el método tradicional de nixtamalización, el cual fue de 21.82% (Tabla 10). Este fenómeno resulta interesante, debido al hecho de que las tortillas producidas con la nixtamalización por IR retuvieron ligeramente mayor contenido de humedad durante la cocción que las obtenidas con el método tradicional. Al respecto, Figueroa-Cárdenas *et al.* (2001) reportaron valores de pérdida de peso alrededor del 23% para tortillas preparadas con nixtamal, y Arámbula-Villa *et al.* (1999) reportaron valores

de 23.52% para tortillas de harina instantánea de maíz extruido. Arámbula-Villa *et al.* (2001) sugieren que es deseable que la pérdida de peso de las tortillas se encuentre en el orden del 20%, ya que esto asegurará que las tortillas presenten cualidades óptimas de textura y un mejor rendimiento, lo cual se traducirá en el aspecto económico. Como se mencionó con anterioridad, la humedad de las tortillas es un factor de suma importancia, ya que está relacionado de manera directa con las propiedades de calidad y de textura de las mismas. Así, una mayor pérdida de peso originará una tortilla con baja humedad la cual puede presentar problemas en su textura, roabilidad y sobre todo comprometer el rendimiento del producto.

## 6.8. Propiedades composicionales de las tortillas

### 6.8.1. Proteína

El contenido de proteína se redujo ligeramente después de la nixtamalización y la elaboración de las tortillas. El grano de maíz presentó un contenido de proteína de 9.34% (Tabla 6), y una vez nixtamalizado por los métodos tradicional e IR, el contenido de proteína se redujo a 8.81% y 8.69%, respectivamente.

**Tabla 11. Composición química de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización**

Componente	Nixtamalización	
	Tradicional	IR
Proteína	8.81 ± 0.05 <sup>a</sup>	8.69 ± 0.04 <sup>a</sup>
Lípidos	3.47 ± 0.23 <sup>a</sup>	4.34 ± 0.29 <sup>b</sup>
Ceniza	1.74 ± 0.15 <sup>a</sup>	1.79 ± 0.16 <sup>a</sup>
Fibra	1.80 ± 0.11 <sup>a</sup>	1.85 ± 0.37 <sup>a</sup>
Carbohidratos*	84.18 ± 0.09 <sup>a</sup>	83.33 ± 0.20 <sup>a</sup>

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

Valores con la misma letra en la misma fila entre columnas, no son significativamente diferentes (Dunnet > 0.05).

\*Determinado por diferencia.

Expresado en b.s.

Con estos valores, se observó un decremento del 0.53% para el caso del proceso tradicional de nixtamalización, y del 0.65% para el caso del proceso por IR. Sin embargo,

los valores del contenido de proteína no presentaron diferencia estadística significativa (Tabla 11).

Este comportamiento en el decremento del contenido de proteína durante la nixtamalización ha sido reportado anteriormente por Figueroa-Cárdenas *et al.* (2001) quienes señalaron pérdidas de hasta 1.8%. Por otra parte, Ayala-Rodríguez *et al.* (2009), reportaron valores en el contenido de proteína de 8.93% en tortillas elaboradas a base de harina de maíz nixtamalizado marca Maseca, muy similar a los valores aquí reportados. El contenido de proteína es una característica importante desde el punto de vista nutricional; sin embargo, también lo es por las interacciones proteína-almidón que pueden ocurrir, las cuales conllevan a una reducción en la retrogradación del almidón (Quintanar-Guzmán *et al.*, 2010).

### **6.8.2. Lípidos**

Los resultados del contenido de lípidos en las tortillas se muestran en la Tabla 11. Para este parámetro, se encontró diferencia estadística significativa en las tortillas obtenidas por ambos métodos de nixtamalización. Para el caso de las tortillas obtenidas con la nixtamalización por IR, los lípidos se conservaron en mayor cantidad, presentando un contenido de 4.34%; sin embargo, las tortillas elaboradas con el proceso tradicional presentaron un valor de 3.47% (Tabla 11). Estos valores corresponden a reducciones del 34.2% y 47.4%, respecto al contenido de lípidos en el grano de maíz. Esta disminución en cuanto al contenido de lípidos, es probablemente debido a la saponificación e hidrólisis alcalina de los ácidos grasos durante el proceso de la nixtamalización. El contenido de lípidos en las tortillas, es también un factor importante en la textura, debido a que una alta cantidad de lípidos podría interactuar con el almidón y dar como resultado complejos de amilosa-lípido (Escarpa *et al.*, 1997; Sajilata *et al.*, 2006). El alto contenido de lípidos y sobre todo la formación de complejos con el almidón, retardarán el fenómeno de retrogradación, lo cual podría explicar o asociarse a una textura suave en las tortillas. Según los resultados obtenidos por Agama-Acevedo *et al.* (2005), las tortillas preparadas con masas comerciales presentan valores en el contenido de lípidos entre 3.15 y 3.97%,

los cuales concuerdan con los obtenidos en esta investigación para el caso de las tortillas elaboradas con el método tradicional de nixtamalización. En resumen, las tortillas elaboradas por el método de nixtamalización por IR contenían 25.07% más de lípidos que las tortillas obtenidas con el método tradicional de nixtamalización.

### **6.8.3. Fibra**

En la Tabla 11 también se muestran los resultados del contenido de fibra en las tortillas elaboradas mediante la nixtamalización tradicional e IR. No se encontró diferencia estadística significativa en este parámetro; consecuentemente, las tortillas obtenidas por ambos métodos de nixtamalización presentaron un valor promedio en el contenido de fibra de 1.83%. Este valor en el contenido de fibra es similar al obtenidos por Figueroa-Cárdenas *et al.* (2001) quienes reportaron valores de hasta 1.87% en tortillas obtenidas por nixtamalización tradicional de granos de maíz.

### **6.8.4. Cenizas**

En la Tabla 11 se muestran los resultados del contenido de cenizas para las tortillas elaboradas por ambos métodos de nixtamalización. En general, no se encontró diferencia estadística significativa en el contenido de cenizas, consecuentemente el valor promedio fue de 1.77%. Figueroa-Cárdenas *et al.* (2001) reportaron valores de 1.74% en el contenido de cenizas en tortillas elaboradas a partir de nixtamal, valores muy similares a los aquí reportados.

### **6.8.5. Carbohidratos**

El valor del contenido de carbohidratos para las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización se muestra en la Tabla 11. En el caso de este parámetro, no se encontró diferencia estadística significativa al evaluar las tortillas de ambos procesos, de esta manera el contenido promedio de carbohidratos en las tortillas fue de 83.8%. Martínez-Morquecho (2012) reportó valores del contenido de carbohidratos de 83.36% en

tortillas elaboradas con harina comercial marca Maseca, y valores de hasta 81.3% para tortillas elaboradas con nixtamalización por microondas, empleando una concentración de hidróxido de calcio de 0.5% (p/p). Estos valores del contenido de carbohidratos en las tortillas, concuerdan con los obtenidos en esta experimentación.

## 6.9. Propiedades nutrimentales de las tortillas

### 6.9.1. Lisina

En la Tabla 12 se muestran los resultados del contenido de lisina en las tortillas de maíz obtenidas por los métodos de nixtamalización tradicional e IR. En las tortillas obtenidas por el método tradicional se obtuvo un valor en el contenido de lisina de 25.52 g/kg de proteína, y para el caso de las tortillas elaboradas con el método IR, dicho valor fue de 26.57 g/kg de proteína. Consecuentemente, no se encontró diferencia estadística significativa. Estos resultados en el contenido de lisina en las tortillas son similares a los reportados por Aguilar-Miranda *et al.* (2002) quienes obtuvieron valores de hasta 29 g de lisina/kg de proteína en tortillas elaboradas con harina comercial marca Maseca. En general, el contenido de lisina se redujo en un 23.4%, al procesar los granos de maíz durante la nixtamalización.

**Tabla 12. Propiedades nutrimentales de las tortillas elaboradas con ambos métodos de nixtamalización**

Parámetro	Nixtamalización	
	Tradicional	IR
Lisina (g/kg proteína)	25.52 ± 0.43 <sup>a</sup>	26.57 ± 0.65 <sup>a</sup>
Triptófano (g/kg proteína)	2.02 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.48 ± 0.06 <sup>b</sup>
Digestibilidad de la proteína <i>in vitro</i> (%)	84.51 ± 0.13 <sup>a</sup>	84.57 ± 0.11 <sup>a</sup>

Valor promedio de al menos 3 repeticiones ± error estándar.

Valores con la misma letra en la misma fila entre columnas no son significativamente diferentes (Dunnett > 0.05).

### 6.9.2. Triptófano

Los valores del contenido de triptófano en las tortillas obtenidas con el proceso tradicional y el IR se muestran en la Tabla 12. El contenido de triptófano en el grano de

maíz fue de 6.81 g/kg de proteína (Tabla 7), y se redujo a valores de 2.02 y 3.48 g/kg de proteína en las tortillas producidas mediante la nixtamalización tradicional e IR, respectivamente. Estos valores en la reducción del contenido de triptófano corresponden a degradaciones de 70.3 y 48.9%. Cuevas-Martínez *et al.* (2010) reportaron un contenido de triptófano de 3.45 g/kg de proteína en tortillas de maíz elaboradas con una concentración de 1.5% de hidróxido de calcio durante la nixtamalización, valor muy similar al obtenido en las tortillas elaboradas con el método de nixtamalización con IR.

Cabe señalar que con el consumo de estas tortillas, se cubriría parcialmente el requerimiento de la FAO de 9.6 g/kg de proteína (FAO/WHO/UNU, 1985). De esta manera, al consumir las tortillas obtenidas por el método tradicional de nixtamalización se obtendría el 21.0% y el 36.3% con las tortillas obtenidas por el método IR. En resumen, las tortillas elaboradas por el método de nixtamalización por IR contenían 72.28% más de triptófano que las tortillas obtenidas con el método tradicional de nixtamalización.

### **6.9.3. Digestibilidad de la proteína *in vitro***

La Tabla 12 también muestra los valores de la digestibilidad de la proteína *in vitro* de las tortillas obtenidas con ambos métodos de nixtamalización. En el caso de este parámetro, no se encontró diferencia estadística significativa para las tortillas provenientes de ambos métodos de nixtamalización; consecuentemente, el valor promedio en la digestibilidad fue de 84.54% (Tabla 11). Al respecto, Méndez-Albores *et al.* (2012) reportaron valores promedio de digestibilidad de la proteína (*in vitro*) de 83.79% para tortillas elaboradas empleando nixtamalización por microondas y valores de digestibilidad de hasta 84% para tortillas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado marca Maseca. Adicionalmente, Reyes-Moreno *et al.* (2003) reportaron un valor máximo en la digestibilidad de la proteína de 78.2% para tortillas obtenidas mediante un proceso de extrusión. En general, en esta investigación, la digestibilidad de la proteína *in vitro* se incrementó debido al procesamiento del grano de maíz, considerando que éste presentaba una digestibilidad de 75.24% (Tabla 7).

## 6.10. Propiedades viscoamilográficas

En la Figura 9 se muestran los perfiles de viscosidad de las harinas del grano de maíz y de las tortillas obtenidas con los métodos de nixtamalización tradicional e IR. El grano de maíz presentó el pico más alto de viscosidad, el cual fue de 884 cP y además registró un valor en la retrogradación de 694 cP (perfil A). Martínez-Bustos *et al.* (2001) reportaron un pico máximo de viscosidad de aproximadamente 600 cP y 300 cP para el valor de la viscosidad de retrogradación en grano de maíz de la variedad Toluqueño. Adicionalmente, Méndez-Albores *et al.* (2012) reportaron valores de hasta 765 cP de viscosidad aparente máxima y de 409 cP para la viscosidad de retrogradación en el maíz de la variedad AS-900.

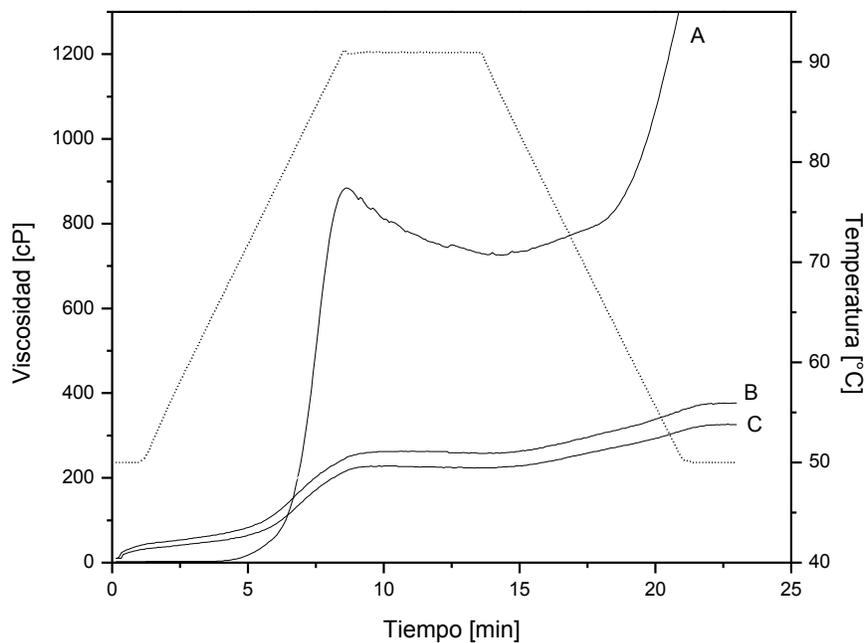


Figura 9. Perfiles viscoamilográficos de: A) harina de grano de maíz, B) tortillas obtenidas con la nixtamalización por IR, y C) tortillas obtenidas con la nixtamalización tradicional.

En lo que respecta a las propiedades viscoamilográficas de las tortillas, no se encontró diferencia estadística significativa en lo que se refiere a la viscosidad máxima, las tortillas

obtenidas por el método de nixtamalización tradicional e IR presentaron picos de viscosidad de 258 cP y 298 cP, respectivamente (perfil C y B). Por el contrario, los valores de viscosidad de retrogradación en las tortillas obtenidas con la nixtamalización tradicional e IR fueron de 109 cP y 88 cP, respectivamente.

Consecuentemente, se encontró diferencia estadística significativa para este parámetro. Méndez-Albores *et al.* (2012) reportaron un valor de viscosidad máxima de 100 cP y de 72 cP de viscosidad de retrogradación en tortillas elaboradas con la adición de 0.125% (p/p) de hidróxido de calcio durante la nixtamalización. Estos valores están en concordancia con los reportados en esta investigación. Al enfriarse las “pastas” de almidón forman un gel viscoelástico, la reasociación molecular que ocurre durante el enfriamiento y almacenamiento de las moléculas de almidón gelatinizado para formar una estructura ordenada, es definida como retrogradación. Así, la retrogradación del almidón es influenciada por la estructura de la amilopectina y la relación amilosa/amilopectina (Ward *et al.*, 1994).

Es probable que valores elevados en el pH, sean un factor que contribuye en la degradación del almidón, dando como resultado baja viscosidad y mayores valores en la retrogradación, como es el caso de las tortillas obtenidas por el método tradicional, en las cuales el valor del pH fue de 8.39 (Tabla 9). Por el contrario, las tortillas obtenidas con la nixtamalización por IR, presentaron el valor más bajo en la viscosidad de retrogradación, lo cual está directamente relacionado con la cantidad de cal retenida durante la cocción del nixtamal, de esta manera el pH de las tortillas alcanzó un valor de 7.59 (Tabla 9). En general, las tortillas obtenidas por el método de nixtamalización por IR, presentaron las mejores características viscoamilográficas y por ende una menor tendencia a la retrogradación.

El calentamiento por IR ha sido recientemente adoptado para su uso en ciertas aplicaciones del procesamiento de alimentos, debido a la superioridad en términos de costo y en la calidad de los productos obtenidos en comparación con el calentamiento convencional, debido a los siguientes fenómenos físicos: a) la radiación infrarroja interactúa con el alimento mediante reflexión, absorción, transmisión, y dispersión, b) la

disipación de la energía radiante resultante como calor, provocará que la temperatura superficial y la capacidad de penetración de la radiación en el alimento tratado, dependa completamente de su composición, y c) el agua y otros componentes orgánicos, tales como las proteínas, los lípidos, y el almidón (principales componentes de los alimentos), absorberán la energía IR. Lo anteriormente señalado hará que el calentamiento de los alimentos sea más uniforme, dando como resultado productos con características sensoriales y de calidad altamente aceptables. Como resultado de ello, en esta investigación, con el proceso de nixtamalización por IR se elaboraron tortillas de maíz con mejores características fisicoquímicas, composicionales, nutrimentales, y viscoamilográficas.

## CONCLUSIONES

Las tortillas obtenidas con la nixtamalización por IR presentaron un valor ligeramente más bajo en el pH (7.59), en comparación con el de las tortillas producidas con la nixtamalización tradicional (8.39).

Se encontró una reducción cercana al 20% en lo referente a la pérdida de peso durante la cocción de las tortillas elaboradas con la nixtamalización por IR en comparación con las tortillas obtenidas con el método tradicional, esto representa una mejor calidad tecnológica, así como un mayor rendimiento de dichas tortillas.

El proceso de nixtamalización por IR permitió que las tortillas retuvieran un 25.1% más de contenido de lípidos, en comparación con las tortillas obtenidas por el método tradicional de nixtamalización, así se mejoró sustancialmente la calidad composicional del producto.

Las tortillas obtenidas con el método IR presentaron un 72.3% más de contenido de triptófano, en comparación con las tortillas obtenidas por el método tradicional de nixtamalización, de esta manera el producto cubre el 36.3% del requerimiento para este aminoácido sugerido por la FAO/WHO.

Las tortillas obtenidas por el método IR presentaron un menor valor en la viscosidad de retrogradación (88 cP), en comparación con el de las tortillas elaboradas con el método tradicional de nixtamalización, las cuales presentaron un valor de 109 cP. Este fenómeno sugiere que las tortillas producidas con el método IR se mantendrán más suaves al tacto por un mayor tiempo en comparación con las tortillas del método tradicional.

Durante la nixtamalización por IR, 40.9% menos en el contenido de sólidos totales fueron perdidos en el nejayote en comparación con el del método tradicional de nixtamalización, lo cual mejora el rendimiento de la masa y consecuentemente el de las tortillas.

En general, con el uso de la radiación IR aplicada a la nixtamalización del grano de maíz, se mejoraron las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas, composicionales, nutrimentales y viscoamilográficas de las tortillas de maíz.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar otras condiciones experimentales durante la nixtamalización por IR como son: el tiempo y la temperatura de cocción, así como la concentración de hidróxido de calcio, sobre las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas, composicionales, nutrimentales y viscoamilográficas de las tortillas obtenidas.

Es recomendable realizar un análisis sensorial de las tortillas elaboradas con el proceso de nixtamalización por IR para conocer el nivel de aceptación del producto.

Es necesario realizar un análisis de la calidad sanitaria de las tortillas producidas con el método de nixtamalización por IR, así como realizar pruebas objetivas en lo referente a la rolabilidad y el grado de inflado de las tortillas, mismas que complementarán las pruebas subjetivas realizadas en esta investigación.

Un proceso cuidadosamente diseñado en el que el grano de maíz sea expuesto adecuadamente a la radiación IR, podría ser recomendado a escala semi-industrial, sin la restricción del tamaño generalmente impuesta por los sistemas domésticos de calentamiento por IR.

Como una alternativa para resolver el problema de la baja calidad de la proteína en los alimentos elaborados a base de cereales como lo es la tortilla de maíz, se recomienda el uso de la nixtamalización por IR, sin realizar grandes modificaciones a las condiciones de procesamiento o al equipo empleado durante la elaboración de las tortillas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(AACC) American Association of Cereal Chemists 2000. Approved methods. 9a ed. St. Paul, MN.: AACC.

(AOAC) Association of Official Analytical Chemist. 2000. Official methods of analysis of AOAC International. 16a ed. 5a Rev. Gaithersburg, Md.: AOAC International.

Agama-Acevedo, E. – Rendón-Villalobos, R. – Tovar, J. – Trejo-Estrada, S. R. – Bello-Pérez, L. A.: Effect of storage time on in vitro digestion rate and resistant starch content of tortillas elaborated from commercial corn masas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 55, 2005, pp. 86-92.

Aguilar-Miranda, E. D. – López G. M. – Escamilla-Santana, C. – Barba de la Rosa, A. P.: Characteristics of maize flour tortilla supplemented with ground *Tenebrio molitor* larvae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2002, pp.192-195.

Arámbula, V. G. – Mauricio, S. R. A. – Figueroa, C. J. D. – González-Hernández, J. – Ordorica, F. C. A.: Corn masa and tortillas from extruded instant corn flour containing hydrocolloids and lime. *Journal of Food Science*, 64, 1999, pp. 120-124.

Arámbula-Villa, G. – Yáñez-Limón, J.M. – Vorobiev-Vasilievich, Y. – González-Hernández, J.: Coeficiente efectivo de difusión de agua en masas de maíz nixtamalizado por extrusión. *Agrociencia*, 34, 2000, pp. 717-727.

Arámbula-Villa, G. – Barrón-Ávila, L. – González-Hernández, J. – Moreno-Martínez E. – Luna-Becerril G.: 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. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51, 2001, pp. 187-194.

Ayala-Rodríguez, A. E. – Gutiérrez-Dorado, R. – Milán-Carrillo, J. – Mora-Rochín, S. – López-Valenzuela, J. A. – Valdez-Ortiz, A. – Paredes-López, O. – Reyes-Moreno, C.: Nixtamalised flour and tortillas from transgenic maize (*Zea mays L.*) expressing amarantin: Technological and nutritional properties. *Food Chemistry*, 114, 2009, pp. 50-56.

Bedolla, S. – Rooney, L. W.: Cooking maize for masa production. *Cereal Foods World*, 27, 1982, pp. 219-221.

Boyer, C. D. – Shannon, J. C.: Carbohydrates of the kernel. En S.A. Watson y P. E. Ramstad, eds. *Corn: chemistry and technology*. American Association of Cereal Chemists, 1987, p. 253-272. St Paul, Minn., USA.

Burge, R.M. – Duensing, W. J.: Processing and dietary fiber ingredient applications of corn bran. *Cereal Foods World*, 34, 1989, pp. 535-538.

Campas-Baypoli, O. N. – Rosas-Burgos, E. C. – Torres-Chavéz, P. I. – Ramírez-Wong, B. – Serna-Saldívar, S. O.: Physicochemical changes of starch in maize tortillas during storage at room and refrigeration temperatures. *Starch/Stärke*, 54, 2002, pp. 358-363.

Contreras-Jiménez, B. L. 2009. Caracterización de harina obtenida por calentamiento óhmico. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN.

Cuevas-Martínez, D. – Moreno-Ramos, C. – Martínez-Manrique, E. – Moreno-Martínez, E. – Méndez-Albores, A.: Nutrition and texture evaluation of maize white common bean nixtamalized tortillas. *Interciencia*, 35, 2010, pp. 828-832.

Energy and Protein Requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series N° 724. Geneva, Switzerland, 1985. 206 pp.

Escarpa, A. – Gonzales, M. C. – Morales, M. D. – Saura-Calixto, F.: An approach to the influence of nutrients and other food constituents on resistant starch formation. *Food Chemistry*, 60, 1997, pp. 527-532.

FAO. El maíz en la nutrición humana. Depósito de documentos de la FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1993, Roma.

FAO/WHO/UNU. 1985. Energy and Protein Requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series N° 724. Geneva, Switzerland. 206 pp.

Figueroa-Cárdenas, J. D. – Acero-Godínez, M. G. – Vasco-Méndez, N. L. – Lozano-Guzmán, A. – Flores-Acosta, L. M. – González-Hernández, J.: Fortification and evaluation of the nixtamal tortillas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51, 2001, pp. 293-302.

Flores-Farías R. – Martínez-Bustos F. – Salinas-Moreno Y. – Kil Chang Y. – González-Hernández J. – Ríos E.: Physicochemical and rheological characteristics of comercial nixtamalised Mexican maize flour for tortillas. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 80, 2000, pp. 657-664.

Friend, C. P. – Waniska, R. D. – Rooney, L. W.: Effects of hydrocolloids on processing and qualities of wheat tortillas. *Cereal Chemistry*, 70, 1992, pp. 252-255.

Gaytán-Martínez, M. – Morales, S.E. – Figueroa-Cárdenas, J. D. C.: Aplicación de un proceso de cocimiento dieléctrico en la elaboración de harinas instantáneas de maíz amarilla para preparación de frituras de masa y tortilla. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 50, 2000, pp. 366-373.

GIMSA. Iniciando cobertura de GIMSA: Compra ¡Y que viva la tortilla! Grupo Industrial Maseca, S. A. B. de C. V. [online]. México. 2012 [cit. septiembre 2013]. <[http://www.actinver.com/documentos/IAalisis/Analisis/Doc/PaginaActinver/inicioCobertura/A120522\\_GRUMA\\_IniciodeCobertura.pdf](http://www.actinver.com/documentos/IAalisis/Analisis/Doc/PaginaActinver/inicioCobertura/A120522_GRUMA_IniciodeCobertura.pdf)>

Gómez, M. H. 1988. Physicochemical characteristics of fresh masa from alkaline process corn and sorghum and corn dry masa flour. PhD dissertation. Texas A&M University, College Station. pp. 105.

Gómez, M. H. – McDonough, C. M. – Rooney, L. W. – Waniska, R. D.: Changes in corn and sorghum during nixtamalization and tortilla baking. *Journal of Food Science*, 53, 1989, pp. 330-336.

Gómez, M. H. – Lee, J. K. – McDonough, C. M. – Waniska, R. D. – Rooney, L. W.: Corn starch changes during tortilla and tortilla chip processing. *Cereal Chemistry*, 69, 1992, pp. 275-279.

Gómez-Agramón, M. M. – Serna-Saldivar, S. O.: Effect of deffated soybean isolate on the nutritional, physical, chemical and organoleptic properties of wheat flour tortillas. *Journal of Food Science*, 53, 1987, pp. 793-797.

Gutiérrez-Coronado, M. L. – Coronado-Amaya, E. – Vázquez-Ortíz, F. A. – López-Franco, Y. L. – Ortega-Corona, A.: Physical and chemical characterization of quality protein maize. *Journal of Food*, 7, 2009, pp. 111-118.

Gutiérrez-Uribe, J. A. – Rojas-García, C. – García-Lara, S. – Serna-Saldivar, S. O.: Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science*, 52, 2010, pp. 410-416.

Ha, J. – Ryu, S. – Kang, D.: Evaluation of Near-Infrared Pasteurization in Controlling *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* Serovar *Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in Ready-To-Eat Sliced Ham. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, 2012, pp. 6458-6465

Hamanaka, D. – Norimura, N. – Baba, N. – Mano, K. – Kakiuchi, M. – Tanaka, F. – Uchino, T.: Surface decontamination of fig fruit by combination of infrared radiation heating with ultraviolet irradiation. *Food Control*, 22, 2011, pp. 375-380

Hamanaka, D. – Uchino, T. – Furuse, N. – Han, W. – Tanaka, S.: Effect of the wavelength of infrared heaters on the inactivation of bacterial spores at various water activities. *International Journal of Food Microbiology*, 108, 2006, pp. 281-285.

Hamanaka, D. – Uchino, T. – Inoue, A. – Kawasaki, K. – Hori, Y.: Development of the Rotating Type Grain Sterilizer using Infrared Radiation Heating. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 52, 2007, pp. 107-110.

Hoseney, R. C. 1986. *Principles of Cereal Science and Technology*. Ed. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN.

Inglett, G. E., 1970. *Corn: culture, processing, products*. Ed. AVI Publishing Company, Inc., London, Eng.

Iturriaga, N. J. 1987. *De tacos, tamales y tortas*. Ed. Diana. México, D. F. p. 125.

Jackson, A. N. – Welch, D. E. 1998. *Industrial applications of electric infrared heating*. Advanced Energy. [www.advancedenergy.org](http://www.advancedenergy.org)

Jackson, D. S. – Rooney, L. W. – Kunze, O. – Whaniska, R.D. Alkaline processing properties of stress-cracked and broken corn (*Zea mays l.*). *Cereal Chemistry*, 65, 1988, pp. 113-117.

Kato, T. A. – Mapes, C. – Mera, L. M. – Serratos, J. A. – Bye, R. A. 2009. *Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica*. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 116 pp. México, D.F.

Limanond, B. – Castell-Pérez M. E. – Moreira, R.: Modeling the kinetics of corn tortilla staling using stress relaxation data. *Journal of Food Engineering*, 53, 2001, pp. 237-247.

López-Cervantes, J. – Sánchez-Machado, D. I. – Rosas-Rodríguez, J. A.: Analysis of free amino acids in fermented shrimp waste by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*. 1105, 2006, pp. 106-110.

Martínez-Bustos, F. – Morales, S. E. – Chang, Y. K. – Herrera-Gómez, A. – Martínez, M. J. L. – Baños, L. – Rodríguez, M. E. – Flores, M. H. E.: Effect of infrared baking on wheat flour tortilla characteristics. *Cereal Chemistry*, 76, 1999, pp. 491-495.

Martínez-Bustos, F. – Martínez-Flores, H. – Sanmartín-Martínez, E. – Sánchez-Sinencio, F. – Chang, Y. K. – Barrera-Arellano, D. – Rios, E.: Effect of the components of maize on the quality of masa and tortillas during the traditional nixtamalisation process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, 2001, pp. 1455-1462.

Martínez-Flores, H. E. – Gaytán-Martínez, M. – Figueroa-Cárdenas, J. D. – Martínez-Bustos, F. – Reyes-Vega, M. L. – Rodríguez-Vidal, A.: Effect of some preservatives on shelf-life of corn tortillas obtained from extruded masa. *Agrociencia*, 38, 2004, pp. 285-292.

Martínez-Montes, J. L. – Sanchez-Sinencio, F. – Ruiz-Torres, M. – Martinez-Bustos, F. 2001. Selective nixtamalization process for the production of fresh whole corn masa, nixtamalized corn flour and derived products. U. S. Patent 6,265, 013.

Martínez-Morquecho, R. A. 2012. Efecto de la concentración del hidróxido de calcio sobre la calidad nutrimental de las tortillas de maíz elaboradas con nixtamalización por microondas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Maya-Cortés, D. C. – Figueroa-Cárdenas, J. D. – Garnica-Romo, M. G. – Cuevas-Villanueva, R. A. – Cortés-Martínez, R. – Véles-Medina, J. J. – Martínez-Flores, H. E.: Whole-grain corn tortilla prepared using an ecological nixtamalization process and its impact on the nutritional value. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 2010, pp. 23-28.

Méndez-Albores A. 2002. Evaluación de la degradación de aflatoxinas en los procesos de nixtamalización. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Querétaro, México.

Méndez-Albores, A. – Arámbula-Villa, G. – Loarca-Piña M.G. – González-Hernández J. – Castaño-Tostado E. – Moreno-Martínez E.: Aflatoxin's fate during the nixtamalization of contaminated maize by two tortilla-making processes. *Journal of Stored Products Research*, 40, 2004a, pp. 87-94.

Méndez-Albores, J. A. – Villa, G. A. – Del Río-García, J. C. – Martínez, E. M.: Aflatoxin-detoxification achieved with Mexican traditional nixtamalization process (MTNP) is reversible. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 2004b, pp. 1611-1614.

Méndez-Albores, A. – Martínez-Morquecho, R. A. – Moreno-Martínez, E. – Vázquez-Durán, A.: Technological properties of maize tortillas produced by microwave nixtamalization with variable alkalinity. *African Journal of Biotechnology*, 11, 2012, pp. 15178-15187.

Méndez-Montealvo, G. – Solorza-Feria, J. – Velázquez del Valle, M. – Gómez-Montiel, N. – Paredes-López, O. – Bello-Pérez, L. A.: Chemical composition and calorimetric characterization of hybrids and varieties of maize cultivated in México. *Agrociencia*, 39, 2005, pp. 267-274.

Morata-Barrado A. 2010. Nuevas tecnologías de conservación de alimentos, 2da ed. pp. 63, 64, 66. A. Madrid Vicente Ediciones, Madrid.

Mudget, R. E.: Microwave properties and heating characteristics of foods. *Food Technology*, 40, 1986, pp. 84-93.

Norad, M. N. – Iskander, F. Y. – Rooney, L. W. – Erp, C. F.: Physicochemical properties of alkali cooked corn using traditional and pre-soaking procedures. *Cereal Chemistry*, 63, 1986, pp. 255-259.

Norma Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI. 2002. Productos alimentarios no industrializados para consumo humano. Cereales. Parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado. Especificaciones y métodos de prueba.

Nurit, E. – Tiessen, A. – Pixley, K. V. – Palacios-Rojas, N.: Reliable and inexpensive colorimetric method for determining protein-bound tryptophan in maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 2009, pp. 7233-7238.

Omori, T. 1992. Bioelectromagnetics and its applications. Fuji Techno-System. Tokyo, Japan. pp. 36-43.

Orr, M.L. – Walt, B.K.: Amino acid content of foods. Home Economics Research Report No. 4. Washington, D.C., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1957, pp. 88.

Paredes-López, O. – Guevara-Lara, F. – Bello-Pérez, L. A.: La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz. *Ciencias* 92-93. 2008, pp. 60-70.

Paredes-López, O. – Saharópulus-Paredes, M. E.: Scanning electron microscopy studies of limed corn kernels for tortilla making. *Food Technology*, 17, 1982, pp. 687-693.

Pedroza-Islas, R. – Duran de Bazúa, C.: Aerobic treatment of maize-processing wastewater in a 50-liter rotating biological reactor. *Biological Wastes*, 32, 1990, pp. 17-27.

Pérez-Flores, G. C. – Moreno-Martínez, E. – Méndez-Albores, J. A.: Effect of microwave heating during alkaline-cooking of aflatoxin contaminated maize. *Journal of Food Science*, 76, 2011, pp. 48-52.

Proyecciones de la población de México 2010-2050. En: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [online]. México: Consejo Nacional de Población, 2010 [cit. 4 Junio 2013]. <<http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>>

Quintanar-Guzmán, A. – Jaramillo-Flores, M. E. – Solorza-Feria, J. – Méndez-Montealvo, M. G. – Wang Y. J.: Effects of polymerization changes in maize proteins during nixtamalization on the thermal and viscoelastic properties of masa in model systems. *Journal of Cereal Science*, 52, 2010, pp. 152-160.

Ramírez-Wong, B. – Sweat, V. E. – Torres, P. L. – Rooney, L. W.: Development of two instrumental methods for corn masa texture evaluation. *Cereal Chemistry*, 70, 1993, pp. 286-290.

Reyes-Moreno, C. – Milán-Carrillo, J. – Gutiérrez-Dorado, R. – Paredes-López, O. – Cuevas-Rodríguez, E. O. – Garzón-Tiznado, J. A.: Instant flour from quality protein maize (*Zea mays l.*). Optimization of extrusion process. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 36, 2003, pp. 685-695.

Rodríguez-García, M. E. – Serna-Saldívar, S. O. – Sánchez-Sinencio, F. 2008. Nixtamalización del maíz a la tortilla. Aspectos nutrimentales y toxicológicos. En: Serie Ingeniería. 1a ed. Universidad Autónoma de Querétaro.

Rooney, L. W. – Serna-Saldívar, S. O. 1987. Foods Uses of Whole Corn and Dry-Milled Fraction. Cap. 13. Corn: chemistry and technology. S. A. Watson and P. E. Ramstad. p. 399-429. Ed. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN.

Rubio, M. 1989. La industria de la harina y la tortilla. Su modernización. La industria del maíz. Maíz Industrializado Conasupo y grupo Maseca (Ed). pp. 102-135. ed. Grupo Azabache. México D.F.

Sahai, D. – Surjewan, I. – Mua, J. P. – Buendía, M. O. – Rowe, M. – Jackson, D. S.: Dry matter loss nixtamalization of a white corn hybrid: Impact of processing parameters. *Cereal Chemistry*, 77, 2000, pp. 254–258.

Sajilata, M.G. – Singhal, R.S. – Kulkarni, P.R.: Resistant starch-A review. *Comprehensive Reviews in Food Safety*, 5, 2006, pp. 1-17.

Sakai, N. – Hanzawa, T.: Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science & Technology*, 1994, pp. 357-362.

Salinas-Moreno, Y. – Aguilar-Modesto, L.: Effect of maize (*Zea mays l.*) grain hardness on yield and quality of tortilla. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2, 2010, pp. 5-11.

Salmerón-Alcocer, A. – Rodríguez-Mendoza, N. – Pineda-Santiago, V. – Cristiani-Urbina, E. – Juárez-Ramírez, C. – Ruíz-Ordaz, N. – Galíndez-Mayer, J.: Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in single-stream multi-stage reactor. *Journal of Environmental Engineering Science*, 2, 2003, pp. 401-406.

Sánchez, F. C. – Salinas, M. Y. – Vázquez C. M. G. – Velázquez, C. G. A. – Aguilar, G. N.: Efecto de las prolaminas del grano de maíz (*Zea mays l.*) sobre la textura de la tortilla. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57, 2007, pp. 295-301.

SAS. 1998. Statistical Analysis System. Introductory guide for personal computers. SAS Institute 6.12 ed. Cary, N.C. USA.

Serna-Saldívar, S. O. – Gómez, M. H. – Rooney, L. W. 1990. Technology, chemistry and nutritional value of alkaline-cooked corn products. Cap. 4. En: *Advances in Cereal Science and Technology*. Vol. X., Y. Pomeranz (Ed.) p. 243-307. American Association of cereal Chemist. St. Paul MN.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. En: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [online]. Mexico (SIAP), 2011 [cit. 4 Junio 2013].

Staack, N. – Ahrné, L. – Borch, E. – Knorr, D.: Effect of infrared heating on quality and microbial decontamination in paprika powder. *Journal of Food Engineering*, 87, 2008, pp. 17-24.

Sumnu, G. – Sahin, S. – Sevimli, M.: Microwave, infrared and infrared-microwave combination baking of cakes. *Journal of Food Engineering*, 71, 2005, pp. 150-155.

Téllez-Girón, A. – Acuff G. R. – Vanderzant, C. – Rooney L. W. *Journal of Food Protection*. 51, 1988, pp. 945-948.

Torres, P. – Guzman-Ortiz, M. – Ramirez-Wong, B.: Revising the role of pH and thermal treatments in aflatoxin content reduction during the tortilla and deep frying processes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 2001, pp. 2825-2829.

Valderrama-Bravo, C. – Gutiérrez-Cortez, E. – Contreras-Padilla, M. – Rojas-Molina, I. – Mosquera, J. C. – Rojas-Molina, A. – Beristain, F. – Rodríguez-García, M. E.: Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. *Journal of Food Engineering*, 110, 2012, pp. 478-486.

Vaqueiro, M. C. – Reyes, P. 1986. Process for producing nixtamalized corn flour. Patent No. 4594260. USA.

Velazco-Martínez, M. – Angulo, O. – Vázquez-Couturier, D. L. – Arroyo-Lara, A. – Monroy-Rivera, J. A.: Effect of dried solids of nejayote on boiler growth. *Poultry Science*, 76, 1997, pp. 1531-1534.

Waliszewski, K. N. – Pardo, V. T. – Carreón, E.: Physicochemical and sensory properties of corn tortillas made from nixtamalized corn flour fortified with spent soymilk residue (okara). *Journal of Food Science*, 67, 2002, pp. 3194-3197.

Ward, K. E. J. – Hosney, R. C. – Seib, P. A.: Retrogradation of amylopectin from maize and wheat starches. *Cereal Chemistry*, 71, 1994, pp. 150-155.

Watson, S.A. 1987. Structure and composition. En S.A. Watson y P.E. Ramstad. eds. *Corn: chemistry and technology*, p. 53-82. St Paul, USA. American Association of Cereal Chemists.

Yang, J. – Bingol, G. – Pan, Z. – Brandl, M. T. – McHugh, T. H. – Wang, H.: Infrared heating for dry-roasting and pasteurization of almonds. *Journal of Food Engineering*, 101, 2010, pp. 273-280.

Zhongli Pan – Griffiths-Gregory Atungulu. 2010. *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. CRC Press. ISBN: 1420090976. pp. 300.

\*El formato de las referencias bibliográficas corresponde a las recomendaciones del *Journal of Food and Nutrition Research*.

# **Anexo**

## Impact of different alkaline-heating processes on technological and nutritional properties of maize tortillas

ABRAHAM MÉNDEZ-ALBORES – DAMIÁN ZAMORA-RODRÍGUEZ –  
GERÓNIMO ARÁMBULA-VILLA – ALMA VÁZQUEZ-DURÁN – ERNESTO MORENO-MARTÍNEZ

### Summary

The effects of three different alkaline-cooking processes (gas-fired or traditional method, ultrasonic-bath and infrared heating) were evaluated on certain physicochemical, quality, compositional, nutritional and viscoamylographic properties of maize tortillas. All tortillas presented adequate physicochemical and quality characteristics for consumption. However, tortillas from infrared nixtamalization retained 25.1% and 32.7% more lipids, as well as 72.3% and 41.5% more tryptophan than traditional and ultrasonic-bath tortillas, respectively. The chemical composition of the nejayote from traditional, ultrasonic-bath, and infrared nixtamalization showed that the lost of maize solids was 3.1%, 3.5%, and 1.8% (w/w), respectively. During infrared nixtamalization 40.9% and 47.3% less of the total solids were lost as compared to traditional and ultrasonic-bath nixtamalization. Furthermore, tortillas from infrared nixtamalization presented the lowest value of starch retrogradation. According to these results, a novel and innovative nixtamalization procedure based on infrared heating was developed to produce tortillas with improved physicochemical, compositional, nutritional and pasting properties.

### Keywords

maize; alkaline-heating processes; tortillas; technological properties, nutritional properties

Mexico, with an estimated population of 118.3 million people [1], has the highest world per capita consumption of maize. In 2011, the maize production was over 27.27 million metric tons, about 17.64 million of which were destined for human consumption, 9.61 million for feed, and the rest for seed use [2]. Mesoamerica landraces, varieties and hybrids are harvested all year around under diverse climatic conditions. Therefore, the growing, harvesting and postharvest handling vary between geographic zones, which affects the quality of maize-based products. The maize grains contain 7% to 13% protein (dry basis), but the quality of protein is deficient because zein, the main protein fraction, has low contents of the essential amino acids lysine and tryptophan [3]. Thus, the consumption of proteins with insufficient essential amino acids is a great problem in

some areas of Mexico, principally where “regular” maize is the basic staple food.

In Mexico, maize is primarily consumed as tortillas, with a per capita consumption of about 120 kg per year [4]. These are traditionally made utilizing the ancestral alkaline-cooking process called nixtamalization. The traditional nixtamalization process (TNP) consists of cooking of the grain in abundant water (2–3 l of water per kilogram of maize processed) with 1–3%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  at temperatures near boiling, for 35–70 min, with a steeping period of 8–16 h. After the steeping, the lime cooking solution (nejayote) is decanted, and the grain is thoroughly washed to leave the grain (nixtamal) ready for milling to produce the masa (maize dough) for making the tortillas. It is well known that TNP enhances the nutritional value of maize proteins by increasing the availability of

---

**Abraham Méndez-Albores, Damián Zamora-Rodríguez, Ernesto Moreno-Martínez**, National Autonomous University of Mexico, Superior Studies Faculty at Cuautitlan (UNAM-FESC), Campus 4, Multidisciplinary Research Unit, Km 2.5 Carretera Cuautitlan-Teoloyucan, 54714 Cuautitlan Izcalli, Mexico.

**Gerónimo Arámbula-Villa**, Center for Research and Advances Studies of the National Polytechnic Institute, Campus Queretaro (CINVESTAV-IPN), Libramiento Norponiente 2000, Fraccionamiento Real de Juriquilla, 76230 Queretaro, Mexico.

**Alma Vázquez-Durán**, Autonomous University of Nuevo Leon, Agronomy Faculty (UANL-FA), Agropecuary Sciences Campus, Avenida Francisco Villa s/n, Colonia Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, 66050 Nuevo Leon, Mexico.

*Corresponding author:*

Abraham Méndez-Albores, tel.: (+52) 5556231999; fax: (+52) 5556239402, e-mail: albores@unam.mx

the essential amino acids in the different fractions [5], and leading to the incorporation of calcium ions into the cooked grain [6]. Unfortunately, TNP also leads to losses of some nutrients including lipids, proteins, amino acids, dietary fibre, vitamins and minerals. Due to this fact, the tortilla industry suffers from a compromise in tortilla quality due to low protein levels, as well as deficiencies in lysine and tryptophan. Due to the growing interest in consumption of tortillas in several countries around the world, many studies have been conducted regarding tortilla fortification. In these studies, the chemical score of protein was increased by adding: soybean flour [7, 8], defatted soybean flour [9], sesame and sorghum [10], cottonseed flour [11], germinated corn [12], spent soymilk residue, and lysine and tryptophan incorporation [13, 14]. However, such strategies have proven to be expensive and/or impractical, due to the changes in the physicochemical, textural and sensorial properties of the enriched tortilla.

Over the past four decades, alternative technologies for producing maize flours to prepare tortillas have been proposed, including drum drying [15], micronizing or dry heat treatment [16], microwave and ohmic heating [17, 18], extrusion [19], ecological nixtamalization [20] and power ultrasound [21]. However, nixtamalized products made by these methods are not comparable in quality to those obtained through traditional nixtamalization. In order to eliminate the above-mentioned disadvantage, it has become necessary to find new alternative methods or modifications to TNP. Consequently, the present research was conducted to investigate the physicochemical, quality, compositional, nutritional and viscoamylographic properties of maize tortillas produced by two alternative nixtamalization processes, ultrasonic-bath heating and infrared cooking, and compared to those of tortillas produced by TNP. The alternative technologies were selected in order to explore the effect of other not complex heating systems to suggest alternative methods that have no greater deviation from the traditionally established nixtamalization process for possible commercial applications.

## MATERIALS AND METHODS

### Maize grain

Regular maize of the commercial hybrid AS-900 (Aspros Comercial, Cortazar, Guanajuato, Mexico) grown and harvested in 2012 at Celaya-Guanajuato, Mexico, with 9.6% moisture content (*MC*), was utilized. This material had a thousand-

kernel weight and test weight of  $283.40 \text{ g} \pm 3.64 \text{ g}$  and  $71.59 \text{ kg} \cdot \text{hl}^{-1} \pm 1.23 \text{ kg} \cdot \text{hl}^{-1}$ , respectively. The *MC* was determined by forced air oven (Blue M, Blue Island, Illinois, USA) drying at  $103^\circ\text{C}$  for 72 h, with three replicates of 5–10 g each of whole grain, with percentages calculated on a wet-weight basis [22].

### Tortilla-making processes

For traditional nixtamalization, three 1 000 g whole maize samples were mixed with 3 l of tap water, and 10 g of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  were added (JT Bajer, Xalostoc, Estado de Mexico, 99% calcium hydroxide). The maize was gas-fire cooked in a covered aluminium pan for 37 min at  $80^\circ\text{C}$ . For ultrasonic-bath heating and infrared nixtamalization, the maize was cooked using the same maize/tap water input ratio, cooking time and lime content as in TNP.

For ultrasonic-bath heating, a multi-frequency Transsonic TI-H-5 (Elma, Hans Schmidbauer, Singen, Germany) unit was used. The stainless-steel transducer tank was set at a temperature of  $80^\circ\text{C}$ , and the nixtamal was cooked with an ultrasound frequency of 25 kHz using an average power of 100%. The ultrasound frequency of 25 kHz was chosen because cavitation action is much more vigorous at lower frequencies. The power output of the ultrasonic transducer was 550 W.

For infrared-heating, the cooking stage was carried out in a 12 l capacity domestic commercial convection infrared oven (Thane International, model AX-767MH, Zhejiang, China), with an average cooking temperature set at  $260^\circ\text{C}$ . Using this temperature condition, the nixtamal was cooked at approximately  $80^\circ\text{C}$ . The power output of the infrared lamp specified by the manufacturer was 1300 W, and the operating frequency was 60 Hz.

After nixtamalization, the cooked grain was steeped in a closed plastic container for 18 h at room temperature ( $24^\circ\text{C}$ ) and the nejayote was removed. The cooked maize was washed with 3 l of tap water to remove lime excess and pericarp tissue. Finally, the nixtamal was stone-ground (FUMASA, Model MN-400, Puebla, Mexico) to provide a masa with *MC* of about 54%.

### Tortilla preparation

Masa was compressed into thin disks of approximately 12.5 cm diameter, 1.2 mm thickness and 28 g weight, using a commercial tortilla roll machine (Model TM-G, Casa Gonzalez, Monterrey Nuevo Leon, Mexico). Tortillas were baked for 17 s on one side (first side), 55 s on the other side, and again 17 s on the first side on a griddle

at 270 °C. The temperature was measured with a non-contact portable infrared thermometer Fluke-572 (Fluke, Melrose, Massachusetts, USA). Finally, masa (500 g) and tortillas from each treatment ( $n = 30$ ) were oven-dried at 40 °C for 48 h, then milled and stored at 4 °C in polyethylene bags for further analysis. Fresh tortillas were also kept for determination of some quality properties.

### Physicochemical properties

#### pH

The pH was determined according to the AOAC method 943.02 [23]. Ten grams of sample were suspended in 100 ml of recently boiled distilled water. The suspension was shaken (25 Hz, 25 °C, 30 min) using an orbital shaker (Cole Parmer Model 21704-10; Vernon Hills, Illinois, USA). After 10 min, the supernatant liquid was decanted and pH was immediately determined using a pH meter, Model PC45 (Conductronic, Puebla, Mexico). pH determinations were performed in triplicate for each independent experiment.

#### Colour

Tortillas were subjected to surface-colour analysis with a MiniScan XE model 45/0-L colorimeter (Hunter Associates Laboratory, Reston, Virginia, USA). The colorimeter was calibrated with a white porcelain plaque ( $L = 97.02$ ,  $a = 0.13$ ,  $b = 1.77$ ). Readings were made in triplicate at four positions at 90° with respect to each other. Three derived functions, total colour difference ( $\Delta E$ ), chroma ( $C^*$ ), and hue angle ( $h$ ), were computed from the  $L$ ,  $a$ , and  $b$  readings, as follows:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

$$C^* = \sqrt{\frac{a^2}{b^2}} \quad (2)$$

$$h = \arctan \frac{b}{a} \quad (3)$$

### Quality properties

#### Puffing degree

Tortilla puffing was evaluated subjectively by using scores of 1–3, where: 1 – little or no puffing (0–25%), 2 – medium puffing (25–75%), and 3 – complete puffing (75–100%), as recommended by CUEVAS-MARTÍNEZ et al. [24]. Three tortillas for each independent experiment were evaluated.

#### Rollability

Rollability was evaluated by rolling a tortilla

over a 1 cm diameter tube, quantifying the extent of breakage utilizing a scale of 1–3, where: 1 – tortillas with no breaking; 2 – partial breaking at the center and edges of the tortilla; and 3 – completely flattened tortillas [24]. Tortillas were kept in thermally insulated plastic containers and, within 15 min after preparation, warm tortillas (45 °C) were subjected to rollability test. Three tortillas for each independent experiment were evaluated.

#### Weight loss of tortilla during cooking

The weight loss ( $WL$ ) of tortilla was determined by weighing the tortilla before and after cooking, three tortillas for each independent experiment being evaluated. The value was reported as percentage (w/w) computed as:

$$WL = \frac{(W_a - W_b)}{W_a} \times 100 \quad (4)$$

where  $W_a$ ,  $W_b$  is weight of tortilla before and after cooking, respectively.

#### Compositional analysis

The following analyses were performed in triplicate for maize and tortillas:  $MC$  (drying at 105 °C for 24 h); ash (incineration at 550 °C); crude protein (micro-Kjeldahl,  $N \times 6.25$ ); crude fat (defatting in a Soxhlet equipment with hexane); and crude fibre content (acid and alkaline hydrolysis), following AOAC official methods 925.10, 923.03, 960.52, 920.39C, and 962.09E, respectively [23].

### Nutritional properties

#### Lysine

Lysine analysis was performed using the method described by LÓPEZ-CERVANTES et al. [25] using high performance liquid chromatography (Alliance HPLC; Waters Associates, Milford, Massachusetts, USA), equipped with a Waters Nova-Pak C18 reverse-phase column (4  $\mu\text{m}$ , 3.9 mm  $\times$  150 mm) maintained at 38 °C. Flour samples (50 mg) were hydrolysed at 110 °C with 10 ml of 6 mol·l<sup>-1</sup> HCl for 24 h. The hydrolysed sample was filtered and the extract diluted 200 times with MilliQ water (EMD Millipore, Billerica, Massachusetts, USA). A 300  $\mu\text{l}$  aliquot of the extract was dried and derivatized with the same amount of 9-fluorenylmethyl-chloroformate (FMOC). Standards as well as sample amounts (20  $\mu\text{l}$ ), were injected into HPLC and eluted with a mobile phase of 30 mmol·l<sup>-1</sup> ammonium phosphate (pH 6.5) in 15:85 (v/v) methanol : water; 15:85 (v/v) methanol : water; and 90:10 (v/v) acetonitrile : water, at a flow rate of 1.2 ml·min<sup>-1</sup>. The gradient program employed was as reported

by LÓPEZ-CERVANTES et al. [25]. Lysine was fluorometrically detected and identified using a fluorescence detector (Waters model 2475); the excitation and emission wavelengths were 270 nm and 316 nm, respectively. Analyses were done in triplicate.

### Tryptophan

Tryptophan analysis was performed using the colorimetric method described by NURIT et al. [26]. Flour samples were defatted with hexane in a Soxhlet-type continuous extractor for 6 h. After hexane evaporation, 80 mg of powder was digested using 3 ml of 4 mg·ml<sup>-1</sup> papain solution in 0.165 mol·l<sup>-1</sup> sodium acetate. The tubes were incubated at 65 °C for 16 h, allowed to cool to room temperature, and centrifuged at 3 600×g for 10 min. Subsequently, 1 ml of the supernatant was carefully transferred to a clean tube, and 3 ml of a colorimetric reagent (0.1 mol·l<sup>-1</sup> glyoxylic acid in 3.5 mol·l<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 1.8 mmol·l<sup>-1</sup> FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O + 15 mol·l<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) was added. Samples were vortexed and then incubated at 65 °C during 30 min. Samples were allowed to cool to room temperature before reading their absorbance at 560 nm in a Beckman-Coulter DU-530 UV-visible spectrophotometer (Beckman-Coulter, Brea, California, USA). A calibration curve was constructed using standard tryptophan (Sigma, St. Louis, Missouri, USA). Analyses were done in triplicate.

### In vitro protein digestibility

In vitro protein digestion (*PD*) was performed using the AOAC method 982.30G [23]. A multi-enzyme cocktail, consisting of a mixture of porcine pancreatic trypsin type IX, porcine intestinal peptidase grade I, bovine pancreatic  $\alpha$ -chymotrypsin type II, and bacterial protease (Sigma), was used. Sodium caseinate was used as a control (10 g suspended in 200 ml distilled water and adjusted to pH 8 with NaOH). Flour samples and distilled water were used to prepare 10 ml of an aqueous protein suspension (10 mg N) with pH adjusted to 8.0, while stirring in a water bath at 37 °C during 1 h. The multi-enzyme cocktail was maintained in an ice bath and adjusted to pH 8.0. While stirring, 1 ml of the multi-enzyme solution was added to the protein suspension and 10 min after addition, 1 ml of bacterial protease was added and then the mixture was transferred to 55 °C bath for 9 min. Exactly, 19 min after reaction, vials were transferred back to 37 °C bath. The rapid pH drop was recorded automatically over a 20 min period using a pH meter (Conductronic). Samples were analysed in triplicate. Percentage of *PD* was calculated as follows:

$$PD = 234.84 - 2256 (\text{pH value}) \quad (5)$$

where 234.84 is the intercept, and 22.56 is the slope in the linear regression equation.

### Viscoamylographic properties

Relative viscosity of water suspensions of the ground material was determined in a Rapid Visco Analyzer RVA-4 (Newport Scientific, Sydney, Australia). Tortillas were dried in a vacuum oven at 40 °C during 48 h, then milled and sieved to provide the ground material with a particle size of < 250  $\mu\text{m}$  (60 US mesh, sieve size, 0.251 mm). A sample of 3.5 g adjusted to 14% *MC* was placed in a can for RVA and suspended in 25.5 g distilled water. A plastic stirring paddle was placed in the sample can, which was then fixed into RVA, and the heating cycle was activated through a split copper block. The analyser used a time-temperature program as follows: initiating at 50 °C (1 min), increasing the temperature to 92 °C at a rate of 5.6 °C·min<sup>-1</sup> (7.5 min), remaining 5 min at that temperature, and later decreasing the temperature to 50 °C at the same rate used during the heating, and remaining at that temperature for 2 min, with a total test time of 23 min. The rotational frequency of the paddle was 14.3 Hz for the first 10 s, then 2.7 Hz for the remainder of analysis. From the pasting curves, the values of viscosity peak and setback (difference between the viscosity at the end and the beginning of the cooling period) were registered. Samples were analysed in triplicate.

### Experimental design and statistical analysis

The experiment was conducted as a completely randomized design, the three experimental conditions were carried out with three replicates. Data were assessed by analysis of variance (ANOVA) and means comparisons were performed according to the Dunnett's test using the Statistical Analysis System (SAS Institute, Cary, North Carolina, USA). A significance value of  $p = 0.05$  was used to distinguish significant differences between treatments.

## RESULTS AND DISCUSSION

Tab. 1 shows the physicochemical, compositional and nutritional properties of the maize grain studied. Results on these properties are quite similar to those reported previously by other researchers [27–29]. On the other hand, significant differences were determined in masa for *MC* and pH, as shown in Tab. 2 among physicochemical

**Tab. 1.** Physicochemical, compositional and nutritional properties of the maize grain.

	Maize (AS-900)
<b>Physicochemical properties</b>	
Moisture content [%]	9.6 ± 0.1
pH	6.46 ± 0.02
<b>Colour</b>	
Luminosity <i>L</i>	64.15 ± 0.03
Total colour difference $\Delta E$	37.93 ± 0.04
Chroma <i>C*</i>	20.70 ± 0.05
Hue angle <i>h</i>	82.29 ± 0.13
<b>Proximate composition</b>	
Protein [%]	9.3 ± 0.0
Lipids [%]	6.6 ± 0.0
Ash [%]	1.8 ± 0.1
Crude fibre [%]	2.3 ± 0.0
Saccharides [%]	80 ± 0.1
<b>Nutritional properties</b>	
Lysine [g·kg <sup>-1</sup> ]	33.95 ± 0.27
Tryptophan [g·kg <sup>-1</sup> ]	6.81 ± 0.09
In vitro protein digestibility [%]	75.2 ± 2.0

Mean values of three replicates ± standard error are presented.

Proximate composition is expressed on dry basis. Saccharides were determined by difference. Lysine and tryptophan are expressed per kilogram of proteins.

properties of masa and nejayote produced by the three different alkaline-cooking processes. Masa from traditional nixtamalization had the highest MC and pH value, 57.6% and 8.47, respectively (Tab. 2). The lowest pH (7.35) was observed in masa from infrared nixtamalization. Ultrasonic-bath nixtamalization produced nejayote with the highest content of organic solids (3.5%); on the contrary, infrared nixtamalization registered the lowest value in this parameter (1.8%). In regard to

this respect, JANVE et al. [21] reported that the total solid losses for ultrasound nixtamalization was found to be approximately 6% w/w of dry maize, mainly attributed to cavitation effects of the power ultrasound, which caused more leaching of soluble compounds due to the sono-induced endosperm and pericarp separation. CAMPECHANO-CARRERA et al [20] reported 3.2% organic matter content in nejayote from traditional nixtamalization and values up to 1.4% from ecological variants using calcium salts. Moreover, GUTIÉRREZ-URIBE et al. [30] reported contents of organic solids from 2.5% to 7.9% in nejayote obtained by traditional lime-cooking of different types of maize kernels. Our data on total solids for nejayote from traditional nixtamalization were in close agreement with the values found by those researchers. However, lower values of organic solids were registered by us in nejayote from ultrasonic-bath nixtamalization. The extremely wide range of the data may be a consequence of the high variability between the process parameters used, considering that dry matter losses are primarily influenced by several processing parameters, including the maize genotype, endosperm hardness, cooking and steeping times, and type of heating.

With infrared nixtamalization, 41% and 47% less of the total solids were lost as compared to the traditional and ultrasonic-bath nixtamalization, respectively. The reduced solids found in infrared nejayote is a great advantage, since nejayote is one of the most difficult to treat waste waters due to the high content of organic soluble and insoluble solids [31]. Significant differences were also found in pH values of nejayote, where infrared nixtamalization produced nejayote with the highest pH (11.45). The lowest pH (10.96), was registered in nejayote from traditional nixtamalization (Tab. 2). Maya-Cortés et al. [32] reported a pH value of 12 in nejayote from traditional nixtamalization, while other authors reported pH values of nejayote ranging from 10.5 to 11.2 [33, 34].

**Tab. 2.** Physicochemical properties of maize dough (masa) and steep liquor (nejayote) produced by different alkaline-heating processes.

		Alkaline-heating process		
		Traditional	Ultrasonic-bath	Infrared
Maize dough (masa)	Moisture content [%]	57.6 ± 0.1 <sup>a</sup>	54.7 ± 0.1 <sup>b</sup>	55.5 ± 0.1 <sup>c</sup>
	pH	8.47 ± 0.02 <sup>a</sup>	7.92 ± 0.01 <sup>b</sup>	7.35 ± 0.03 <sup>c</sup>
Steep liquor (nejayote)	Organic solids [%]	3.1 ± 0.0 <sup>a</sup>	3.5 ± 0.0 <sup>b</sup>	1.8 ± 0.0 <sup>c</sup>
	pH	10.96 ± 0.02 <sup>a</sup>	11.27 ± 0.01 <sup>b</sup>	11.45 ± 0.01 <sup>c</sup>

Mean values of three replicates ± standard error are presented. Means with the same letter in the same row are not significantly different (Dunnett's test,  $p > 0.05$ ).

**Tab. 3.** Physicochemical and quality properties of tortillas produced by different alkaline-heating processes.

	Alkaline-heating process		
	Traditional	Ultrasonic-bath	Infrared
<b>Physicochemical properties</b>			
Moisture content [%]	49.2 ± 0.1 <sup>a</sup>	45.9 ± 0.5 <sup>b</sup>	45.0 ± 0.1 <sup>b</sup>
pH	8.49 ± 0.03 <sup>a</sup>	7.95 ± 0.05 <sup>b</sup>	7.39 ± 0.04 <sup>c</sup>
<b>Colour</b>			
Luminosity <i>L</i>	64.21 ± 0.92 <sup>a</sup>	64.40 ± 0.58 <sup>a</sup>	65.02 ± 0.37 <sup>a</sup>
Total colour difference $\Delta E$	37.96 ± 0.55 <sup>a</sup>	37.66 ± 0.18 <sup>a</sup>	38.75 ± 0.26 <sup>a</sup>
Chroma <i>C*</i>	20.87 ± 0.14 <sup>a</sup>	22.23 ± 0.24 <sup>b</sup>	23.63 ± 0.19 <sup>c</sup>
Hue angle <i>h</i>	86.67 ± 0.73 <sup>a</sup>	86.41 ± 0.19 <sup>a</sup>	86.33 ± 0.41 <sup>a</sup>
<b>Quality properties</b>			
Puffing	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
Rollability	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
Loss of weight [%]	21.8 ± 0.0 <sup>a</sup>	20.8 ± 0.4 <sup>a</sup>	17.5 ± 0.2 <sup>b</sup>

Mean values of three replicates ± standard error are presented. Means with the same letter in the same row are not significantly different (Dunnett's test,  $p > 0.05$ ).

### Physicochemical properties of tortillas

Some physicochemical properties of tortillas are listed in Tab. 3. Regarding *MC*, significant differences were not observed between ultrasonic-bath and infrared tortillas, the average *MC* being 45.5%. Tortillas from traditional nixtamalization had the highest *MC* value (49.2%). MÉNDEZ-ALBORES et al. [35] reported *MC* from 41.9% to 42.2% for tortillas made using TNP from maize stored at high moisture. Also, MÉNDEZ-ALBORES et al. [29] reported *MC* of 53.7% in tortillas produced from the commercial instant maize flour MASECA® (Grupo MASECA, Nuevo Leon, Mexico). Those *MC* values in tortillas are in close agreement with these results. The pH values of tortillas showed significant differences, even when nixtamalization was performed with the same lime content (1%, w/w). Tortillas produced with traditional, ultrasonic-bath and infrared nixtamalization presented average pH values of 8.49, 7.95, and 7.39, respectively (Tab. 3). MARTÍNEZ-FLORES et al. [36] produced tortillas from extruded fresh masa with pH values from 6.68 to 8.45, using 0.25% (w/w) calcium hydroxide. In nixtamalized products, lime content represents an important factor in colour, odour, flavour, shelf life and texture characteristics. When the lime content is not sufficient to give the characteristic alkaline flavour, the tortillas are rejected by consumers. Likewise, if this compound is in excess, tortillas become astringent and are also rejected.

Regarding tortilla surface colour analysis, significant differences were not detected for lumi-

nosity (*L*), total colour difference ( $\Delta E$ ) and hue angle (*h*). However, slightly higher values on *L* and  $\Delta E$  were registered in tortillas produced with infrared nixtamalization (Tab. 3). MÉNDEZ-ALBORES et al. [29] reported *L* and  $\Delta E$  values of 65.03 and 38.22 for tortillas produced by microwave nixtamalization using 0.5% (w/w) lime, respectively. WALISZEWSKI et al. [14] reported hue angle values of 90.35 in tortillas produced with fresh nixtamalized corn flour. Moreover, chroma values (*C\**) significantly differed among treatments, thus tortillas from traditional, ultrasonic-bath and infrared nixtamalization presented values of 20.87, 22.23 and 23.63, respectively (Tab. 3). In this research, the amount of lime retained during nixtamalization significantly affected chroma values of tortillas, thus higher chroma values, as in the case of tortillas prepared by infrared heating, indicated that colour was more “pure” in these samples, since chroma represents colour “purity”. In general, as the alkali content decreased in tortillas, higher chroma values were observed (Tab. 3). WALISZEWSKI et al. [14] reported a chroma value of 20.32 for tortillas made from nixtamalized corn flour. These results on colour are in close agreement with those obtained in this research for traditional tortillas. In general, changes in the colour of tortillas are directly attributed to the amount of lime retained during the cooking of the nixtamal. Lime content affects the tortilla colour even when tortillas are produced from white maize grains, and the colour intensity is closely related to carotenoid pigments, flavonoids and pH. However, the

development of colour during the alkaline-cooking process is more complex, considering that the lime reacts with the different pigments found in the grain and interferes with browning reactions such as caramelization and Maillard reactions [37].

#### Quality properties of tortillas

Tab. 3 shows the quality properties of tortillas. All tortillas evaluated had similar puffing, presenting a value of 3, which indicates a complete puffing (75–100%). A good puffing is obtained when two layers are formed in the tortilla. These layers, produced during the cooking process, are impermeable, retaining the steam that gives rise to the puffing during heating. Also, all tortillas evaluated presented a good rollability (with a value close to 1), defined as no breaking. Therefore, tortillas from all treatments were also considered within the acceptable margins of quality, presenting a soft manual texture and could be rolled without breaking. The values of weight loss during tortilla baking are also presented in Tab. 3. Tortillas from traditional and ultrasonic-bath nixtamalization had no significant differences in loss of weight, the average value being 21.3%. On the contrary, a lower value (17.5%) was registered in tortillas from infrared nixtamalization. This phenomenon was interesting, due to the fact that tortillas produced with infrared nixtamalization retained slightly more *MC* during cooking than traditional and tortillas prepared by ultrasonic-bath cooking. FIGUEROA-CÁRDENAS et al. [5] reported loss of weight values around 23% for tortillas prepared

from nixtamal, and ARÁMBULA-VILLA et al. [19] reported values of up to 23.5% loss of weight for tortillas from extruded instant maize flour supplemented with various types of lipids. These results are consistent with the values found in our research. The lowest loss of weight means the better tortilla quality, due to the fact that *MC* plays an important role on tortilla yield and texture.

#### Compositional properties of tortillas

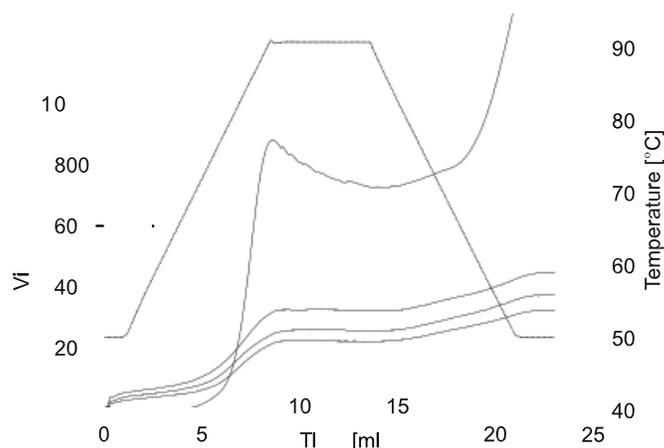
Tab. 4 shows the proximate composition of tortillas. In general, protein content was slightly reduced after nixtamalization. Protein content in raw maize was 9.3% dry basis (Tab. 1), and when nixtamalized, protein was reduced to 8.8%, 8.6%, and 8.7% dry basis for traditional, ultrasonic-bath and infrared nixtamalization, respectively (Tab. 4). These reductions (5.7%, 7.8%, and 6.9%) are consistent with previous reports, which indicate that protein is lost during tortilla elaboration, probably due to solubilization of some protein fractions [38]. On the contrary, lipid content was higher in tortillas prepared by infrared nixtamalization, presenting an average content of 4.3% dry basis, which means that infrared nixtamalization degraded 34.2% of the initial lipid content of the grain. Tortillas prepared by traditional and ultrasonic-bath nixtamalization did not significantly differ in the lipid content, showing an average reduction of 48.9%. The rest of the components (ash, crude fibre and saccharides) presented no significant differences among treatments (Tab. 4).

**Tab. 4.** Proximate composition and nutritional properties of tortillas produced by different alkaline-heating processes.

	Alkaline-heating process		
	Traditional	Ultrasonic-bath	Infrared
<b>Proximate composition</b>			
Protein [%]	8.8 ± 0.1 <sup>a</sup>	8.6 ± 0.0 <sup>b</sup>	8.7 ± 0.0 <sup>a</sup>
Lipids [%]	3.5 ± 0.2 <sup>a</sup>	3.3 ± 0.1 <sup>a</sup>	4.3 ± 0.3 <sup>b</sup>
Ash [%]	1.7 ± 0.2 <sup>a</sup>	1.7 ± 0.3 <sup>a</sup>	1.8 ± 0.2 <sup>a</sup>
Crude fibre [%]	1.8 ± 0.1 <sup>a</sup>	1.8 ± 0.2 <sup>a</sup>	1.9 ± 0.4 <sup>a</sup>
Saccharides [%]	84.2 ± 0.1 <sup>a</sup>	84.6 ± 0.0 <sup>a</sup>	83.3 ± 0.2 <sup>a</sup>
<b>Nutritional properties</b>			
Lysine [g·kg <sup>-1</sup> ]	25.52 ± 0.43 <sup>a</sup>	25.89 ± 1.39 <sup>a</sup>	26.57 ± 0.65 <sup>a</sup>
Tryptophan [g·kg <sup>-1</sup> ]	2.02 ± 0.05 <sup>a</sup>	2.46 ± 0.04 <sup>b</sup>	3.48 ± 0.06 <sup>c</sup>
In vitro protein digestibility [%]	84.5 ± 0.1 <sup>a</sup>	84.2 ± 0.1 <sup>a</sup>	84.6 ± 0.1 <sup>a</sup>

Mean values of three replicates ± standard error are presented. Means with the same letter in the same row are not significantly different (Dunnnett's test,  $p > 0.05$ ).

Proximate composition is expressed on dry basis. Saccharides were determined by difference.



**Fig. 1.** Viscoamylographic profiles of maize and tortillas produced by ultrasonic, infrared and traditional nixtamalization processes.

A – maize, B – ultrasonic nixtamalization, C - infrared nixtamalization, D - traditional nixtamalization.

#### Nutritional properties of tortillas

With respect to nutritional properties, there was no significant difference in lysine content. However, lysine was reduced by 23.4% in tortillas. Tortillas presented an average lysine content of  $25.99 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  protein (Tab. 4). Also, tryptophan was degraded to some extent during nixtamalization. The tryptophan content in tortillas prepared by traditional, ultrasonic-bath and infrared nixtamalization were  $2.02 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $2.46 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and  $3.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  protein, respectively. These values correspond to amino acid degradation of about 70.3%, 63.9% and 48.9%, respectively. CUEVAS-MARTÍNEZ et al. [24] reported reductions of 9.6% and 52.6% in the total lysine and tryptophan contents, respectively, during traditional nixtamalization using 1.5% lime. Those differences in amino acid reduction could be directly attributed to the lime retained during nixtamalization. Tryptophan, an amino acid highly sensitive to the thermal-alkaline treatment, is considered the first limiting amino acid in tortillas, thus tortillas produced by traditional, ultrasonic-bath and infrared nixtamalization covered 21.0%, 25.6% and 36.3%, respectively, of the FAO/WHO requirements [39]. The second limiting amino acid is lysine, covering 47.8% in tortillas produced by the three different nixtamalization procedures. Tortillas from infrared nixtamalization process contained 72% and 41% more tryptophan in comparison with traditional and ultrasonic-bath tortillas, respectively. Tab. 1 and Tab. 4 show the *in vitro* protein digestibility values of raw maize and tortillas, respectively. As expected, tortillas had higher protein digestibility average value (84.4%)

in comparison with maize grain (75.2%). In this research, the parameter increased when maize was processed into tortillas, and no significant differences were determined for tortillas elaborated by the three different nixtamalization processes (Tab. 4). In this context, MÉNDEZ-ALBORES et al. [29] reported protein digestibility values of 76.2% and 84.1% for maize and tortillas, respectively, produced by microwave nixtamalization. Those results are in accordance with the ones reported in this research.

#### Viscoamylographic properties of maize and tortillas

Fig. 1 shows the typical viscoamylographic profiles of maize and tortillas elaborated by the different methods. Raw maize (profile A) presented the highest peak of viscosity ( $884 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) and set-back ( $694 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ). On the contrary, nixtamalization caused a notable decrease in viscosity peak and set-back. However, the differences were not significantly different for the viscosity peak. Tortillas from ultrasonic-bath, infrared, and traditional nixtamalization presented viscosity peaks of  $241 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,  $298 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , and  $258 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , respectively (profiles B, C, and D). Regarding set-back, there were no significant differences in tortillas from ultrasonic-bath and traditional nixtamalization (profiles B and D), the average value was  $109 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . However, tortillas from infrared nixtamalization (profile C) presented the lowest set-back value ( $88 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ). When cooled, pastes will form a viscoelastic gel, the molecular re-association that occurs during the cooling and storage of

gelatinized starch molecules to form an ordered structure are defined as starch setback. Starch setback is influenced by the fine structure of amylopectin and the amylose/amylopectin ratio [40]. During tortilla production, there is enough time and *MC* to gelatinize starch granules, to disperse some of the starch, and to cause much of the amylose become insoluble (retrograde) by the time the product has cooled to room temperature. Setback of amylopectin is believed to involve association of its outer branches and requires a longer time and a lower temperature than amylose to retrograde. Thus, setback of amylopectin occurs with time after the product has cooled [41]. It is most likely that extreme pH values are also a contributing factor to starch degradation, resulting in lower viscosity and higher setback, as in the case of tortillas from traditional and ultrasonic nixtamalization. In this work, it appears that viscosity peak and particularly setback in tortillas prepared by infrared nixtamalization were influenced by the amount of lime retained during the cooking of the nixtamal.

Infrared heating has recently been adopted for use in certain food processing applications, because of its superiority in terms of costs and the quality of the products as compared with conventional heating [42], due to the following physical phenomena: a) the wavelengths of the infrared light interact with foods by reflection, absorption, transmission and scattering, b) the dissipation of radiative energy as heat results in particular surface temperature and penetration depth in the treated food depending on its composition, and c) water and organic compounds such as proteins, lipids and starch (the main components of food-stuffs) absorb the infrared energy. All the above produces a uniform heating of foods, resulting in products with highly acceptable sensory and quality characteristics. In this research, infrared nixtamalization process produced tortillas with improved physicochemical, compositional, nutritional and pasting properties.

## CONCLUSIONS

The use of infrared heating during alkaline-cooking improved the physicochemical, quality, compositional and nutritional properties of maize tortillas. Due to the low solids content, the nejayote from infrared nixtamalization could be less harmful to the environment, and also the cost of effluent processing could be reduced. Consequently, as an alternative for solving the problem of low protein quality of cereal-based foods caused by the high starch content of cereals, infrared nixtama-

lization is recommended, without the need for severe modifications to the processing conditions or equipment during tortilla elaboration. A carefully designed process in which maize is properly exposed to the infrared radiation could provide utilization on industrial scale, without the size restriction usually imposed by the domestic infrared heating systems. Moreover, our results reveal that infrared nixtamalization has a potential to be practical and useful in tortilla-producing factories. However, further experimental conditions such as water/maize input ratio, lime content and cooking time need to be tested to determine their effects on tortilla quality. Further research on use of infrared cooking during nixtamalization is encouraged to determine its effect on the commercial and economical viability of this environmentally friendly tortilla-making process.

## Acknowledgements

The authors are grateful to Miriam Lizbeth Espinoza-Cortés for her technical assistance. The authors are grateful to National Autonomous University of Mexico (UNAM) for the financial support for this research through the Support Program for Research Professorships, Entailment and Education (PACIVE) grant CONS-11.

## REFERENCES

1. Proyecciones de la población de México 2010–2050. In: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [online]. Mexico: Consejo Nacional de Población, 2010 [cit. 4 June 2013]. <<http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>>
2. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. In: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [online]. Mexico: Agrifood and Fishery Information Service (SIAP), 2011 [cit. 4 June 2013]. <[http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=350](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350)>
3. Wilson, C. M.: Protein of the kernel. In: Watson, S. A. – Ramstad, P. E. (Ed.): Corn: chemistry and technology. St Paul: American Association of Cereal Chemists, 1987, pp. 273–390. ISBN 0913250481.
4. Plasencia, J.: Aflatoxins in maize: a Mexican perspective. *Journal of Toxicology*, 23, 2004, pp. 155–177.
5. Figueroa-Cárdenas, J. D. – Acero-Godínez, M. G. – Vasco-Méndez, N. L. – Lozano-Guzmán, A. – Flores-Acosta, L. M. – González-Hernández, J.: Fortification and evaluation of the nixtamal tortillas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51, 2001, pp. 293–302.
6. Reguera, E. – Yee-Madeira, H. – Fernandez-Beltran, J. – Sanchez-Sinencio, F.: Spectroscopic study on the state of calcium in nixtamalized corn grains. In: Heras, H. – Jimenez, R. V. (Ed.): Topics in con-

- temporary physics. Mexico: Monash Litho, 2000, pp. 221–238. ISBN 9701837002.
7. Franze, K.: Tortillas fortified with whole soybeans prepared by different methods. *Journal of Food Science*, *40*, 1975, pp. 1275–1277.
  8. Bressani, R. – Braham, J. E. – Elías, L. G. – Rubio, M.: Further studies on the enrichment of lime treated corn with whole soybean. *Journal of Food Science*, *44*, 1979, pp. 1707–1710.
  9. González-Agramón, M. M. – Serna-Saldívar, S. O.: Effect of defatted soybean meal and soybean isolate on the nutritional, physical, chemical and organoleptic properties of wheat flour tortillas. *Journal of Food Science*, *53*, 1988, pp. 793–797.
  10. Serna-Saldívar, S. – Téllez-Girón, A. – Rooney, L. W.: Production of tortilla chips from sorghum and maize. *Journal of Cereal Science*, *8*, 1988, pp. 275–284.
  11. Mc Pherson, C. M. – Ou, S. L.: Evaluation of corn tortillas supplemented with cottonseed flour. *Journal of Food Science*, *41*, 1976, pp. 1301–1303.
  12. Wang, Y. Y. D. – Fields, M. L.: Enrichment of home-prepared tortillas made from germinated corn. *Journal Food Science*, *43*, 1978, pp. 1630–1631.
  13. Waliszewski, K. N. – Estrada, Y. – Pardo, V. T.: Lysine and tryptophan fortification of nixtamalized corn flour. *International Journal of Food Science and Technology*, *35*, 2000, pp. 523–527.
  14. Waliszewski, K. N. – Pardo, V. T. – Carreón, E.: Physicochemical and sensory properties of corn tortillas made from nixtamalized corn flour fortified with spent soymilk residue (okara). *Journal of Food Science*, *67*, 2002, pp. 3194–3197.
  15. Molina, M. R. – Letona, M. – Bressani, R.: Drum drying for the improved production of instant tortilla flour. *Journal of Food Science*, *42*, 1977, pp. 1432–1434.
  16. Johnson, B. A. – Rooney, L. W. – Khan, M. N.: Tortillas making characteristics of micronized sorghum and corn flours. *Journal of Food Science*, *45*, 1980, pp. 671–674.
  17. Pérez-Flores, G. C. – Moreno-Martínez, E. – Méndez-Albores, A.: Effect of microwave heating during alkaline-cooking of aflatoxin contaminated maize. *Journal of Food Science*, *76*, 2011, pp. 48–52.
  18. Ménera-López, I. – Gaytán-Martínez, M. – Reyes-Vega, M. L. – Morales-Sánchez, E. – Figueroa, J. D. C.: Physico-chemical properties and quality assessment of corn flour processed by a continuous ohmic heating system and traditional nixtamalization. *CyTA – Journal of Food*, *11*, 2013, pp. 8–14.
  19. Arámbula-Villa, G. – González-Hernández, J. – Ordorica-Falomir, C. A.: Physicochemical, structural, and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour supplemented with various types of corn lipids. *Journal of Cereal Science*, *33*, 2001, pp. 245–252.
  20. Campechano-Carrera, E. M. – Figueroa-Cárdenas, J. D. – Arámbula-Villa, G. – Martínez-Flores, H. E. – Jiménez-Sandoval, S. J. – Luna-Bárceñas, J. G.: New ecological nixtamalisation process for tortilla production and its impact on the chemical properties of whole corn flour and wastewater effluents. *International Journal of Food Science and Technology*, *47*, 2012, pp. 654–671.
  21. Janve, B. – Yang, W. – Kozman, A. – Sims, C. – Teixeira, A. – Gunderson, M. A. – Rababah, T. M.: Enhancement of corn nixtamalization by power ultrasound. *Food and Bioprocess Technology*, *6*, 2013, pp. 1269–1280.
  22. Grain equipment manual G.R. 916-6. Federal Grain Inspection Service of the US Department of Agriculture. Kansas City: Richards-Debauer, 1976.
  23. Horwitz, W. (Ed.): Official methods of analysis of AOAC International. 17th ed. Gaithersburg: Association of Official Analytical Chemists International, 2000. 2200 pp. ISBN 0035584773.
  24. Cuevas-Martínez, D. – Moreno-Ramos, C. – Martínez-Manrique, E. – Moreno-Martínez, E. – Méndez-Albores, A.: Nutrition and texture evaluation of maize-white common bean nixtamalized tortillas. *Interciencia*, *35*, 2010, pp. 828–832.
  25. López-Cervantes, J. – Sánchez-Machado, D. I. – Rosas-Rodríguez, J. A.: Analysis of free amino acids in fermented shrimp waste by high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, *1105*, 2006, pp. 106–110.
  26. Nurit, E. – Tiessen, A. – Pixley, K. V. – Palacios-Rojas, N.: Reliable and inexpensive colorimetric method for determining protein-bound tryptophan in maize kernels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *57*, 2009, pp. 7233–7238.
  27. Aguilar-Miranda, E. D. – López G. M. – Escamilla-Santana, C. – Barba de la Rosa, A. P.: Characteristics of maize flour tortilla supplemented with ground *Tenebrio molitor* larvae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*, 2002, pp. 192–195.
  28. Ayala-Rodríguez, A. E. – Gutiérrez-Dorado, R. – Milán-Carrillo, J. – Mora-Rochín, S. – López-Valenzuela, J. A. – Valdez-Ortiz, A. – Paredes-López, O. – Reyes-Moreno, C.: Nixtamalised flour and tortillas from transgenic maize (*Zea mays* L.) expressing amarantin: Technological and nutritional properties. *Food Chemistry*, *114*, 2009, pp. 50–56.
  29. Méndez-Albores, A. – Martínez-Morquero, R. A. – Moreno-Martínez, E. – Vázquez-Durán, A.: Technological properties of maize tortillas produced by microwave nixtamalization with variable alkalinity. *African Journal of Biotechnology*, *11*, 2012, pp. 15178–15187.
  30. Gutiérrez-Urbe, J. A. – Rojas-García, C. – García-Lara, S. – Serna-Saldívar, S.: Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science*, *52*, 2010, pp. 410–416.
  31. Salmerón-Alcocer, A. – Rodríguez-Mendoza, N. – Pineda-Santiago, V. – Cristiani-Urbina, E. – Juárez-Ramírez, C. – Ruíz-Ordaz, N. – Galíndez-Mayer, J.: Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in a single-stream multi-stage reactor. *Journal of Environmental Engineering and Science*, *2*, 2003, pp. 401–406.
  32. Maya-Cortés, D. C. – Figueroa-Cárdenas, J. D. – Garnica-Romo, M. G. – Cuevas-Villanueva, R. A. –

- Cortés-Martínez, R. – Véles-Medina, J. J. – Martínez-Flores, H. E.: Whole-grain corn tortilla prepared using an ecological nixtamalization process and its impact on the nutritional value. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 2010, pp. 23–28.
33. Sahai, D. – Surjewan, I. – Mua, J. P. – Buendía, M. O. – Rowe, M. – Jackson, D. S.: Dry matter loss nixtamalization of a white corn hybrid: Impact of processing parameters. *Cereal Chemistry*, 77, 2000, pp. 254–258.
34. Torres, P. – Guzman-Ortiz, M. – Ramirez-Wong, B.: Revising the role of pH and thermal treatments in aflatoxin content reduction during the tortilla and deep frying processes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 2001, pp. 2825–2829.
35. Méndez-Albores, J. A. – Villa, G. A. – Del Río-García, J. C. – Martínez, E. M.: Aflatoxin-detoxification achieved with Mexican traditional nixtamalization process (MTNP) is reversible. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 2004, pp. 1611–1614.
36. Martínez-Flores, H. E. – Gaytán-Martínez, M. – Figueroa-Cárdenas, J. D. – Martínez-Bustos, F. – Reyes-Vega, M. L. – Rodríguez-Vidal, A.: Effect of some preservatives on shelf-life of corn tortillas obtained from extruded masa. *Agrociencia*, 38, 2004, pp. 285–292.
37. Gómez, M. H. – Rooney, L. W. – Waniska, R. D. – Pflugfelder, R. L.: Dry corn masa flours for tortilla and snack food production. *Cereal Foods World*, 32, 1987, pp. 372–373.
38. Bello-Pérez, L. A. – Osorio-Díaz, P. – Agama-Acevedo, E. – Solorza-Feria, J. – Toro-Vázquez, J. F. – Paredes-López, O.: Chemical and physicochemical properties of dried wet masa and dry masa flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 2003, pp. 408–412.
39. Energy and protein requirements. Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation. WHO Technical Report Series No 724. Geneva : World Health Organization, 1985. 206 pp.
40. Ward, K. E. J. – Hosoney, R. C. – Seib, P. A.: Retrogradation of amylopectin from maize and wheat starches. *Cereal Chemistry*, 71, 1994, pp. 150–155.
41. Keleckci, N. N. – Pascut, S. – Waniska, R. D.: The effects of storage temperature on staling of wheat flour tortillas. *Journal of Cereal Science*, 37, 2002, pp. 377–380.
42. Zhu, Y. – Pan, Z.: Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating. *Journal of Food Engineering*, 90, 2009, pp. 441–452.

---

Received 19 June 2013; 1st revised 2 August 2013; accepted 8 August 2013; published online 11 February 2014.