

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y  
MICROESTRUCTURALES DEL TEOCINTLE”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO EN ALIMENTOS**

PRESENTA

**MARÍA DEL CARMEN VÉLEZ MEDINA**

DIRIGIDA POR

**Dr. JUAN DE DIOS FIGUEROA CÁRDENAS**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2011.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y  
MICROESTRUCTURALES DEL TEOCINTLE”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA**

**MARÍA DEL CARMEN VÉLEZ MEDINA**

**DIRIGIDA POR**

**Dr. JUAN DE DIOS FIGUEROA CÁRDENAS**

**SINODALES**

**Dr. JUAN DE DIOS FIGUEROA CÁRDENAS** \_\_\_\_\_  
DIRECTOR

**Dra. SILVIA AMAYA LLANO** \_\_\_\_\_  
SINODAL

**Dra. MA. ESTELA VAZQUEZ BARRIOS** \_\_\_\_\_  
SINODAL

**M. EN C. BEATRIZ ALVAREZ MAYORGA** \_\_\_\_\_  
SINODAL

## **Agradecimientos**

Al SIN por la beca proporcionada durante un año en la realización de la tesis.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV-IPN) Unidad Querétaro, por todas y cada una de las facilidades otorgadas para el uso de sus instalaciones y equipos, así como al M. en T. Juan Véles; M. en C. Marcela Gaytán y M. en C. Edmundo Gutiérrez, personal auxiliar de los laboratorios 7 y 8. Además de Martin A. Hernández y Eleazar Urbina, encargados del equipo de rayos X y Microscopio respectivamente.

Al Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas, Director del presente proyecto de investigación, quién compartió conmigo su experiencia y conocimiento para realizar un trabajo de equipo.

Al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, México), por la donación de las semillas de teocintle, en especial al Dr. Taba encargado de estas.

A Patricia López Perea, por todo el apoyo brindado durante la realización de mi tesis, así como a todos los compañeros estudiantes del laboratorio Priscila, Ricardo, Nallely, Amira, Tomas, Carol e Iván ya que hicieron más grata la estancia.

A los integrantes del Comité Evaluador: Dra. Silvia Amaya Llano, Dra. Ma. Estela Vázquez Barrios y M. en C. Beatriz Alvarez Mayorga por el apoyo brindado.

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
II. 1 Maíz.	2
II. 1. 1 Descripción botánica del maíz.	2
II. 1. 2 Teorías sobre el origen del maíz.	4
II. 1. 2. 1 Teoría tripartita.	5
II. 1. 2. 2 El teocintle: ancestro del maíz.	5
II. 1. 2. 3 Teoría <i>Tripsacum diploperennis</i> .	6
II. 1. 2. 4 Teoría de la transmutación sexual catastrófica.	8
II. 1. 2. 5 Teoría multicéntrica del origen del maíz.	10
II. 1. 2. 6 Teoría unicéntrica del origen del maíz.	11
II. 1. 3 Distribución del maíz y su pariente silvestre.	13
II. 2 Teocintle.	15
II. 2. 1 Descripción botánica del teocintle.	16
II. 2. 2 Características morfológicas del teocintle y maíz.	17
II. 2. 3 Características genéticas del teocintle y maíz.	19
II. 2. 4 Clasificación taxonómica del género <i>Zea</i> y parientes silvestres.	21
II. 2. 4. 1 <i>Zea mays</i> agrupa cuatro subespecies.	22
II. 2. 5 Distribución del teocintle.	23
II. 2. 5. 1 Distribución del teocintle en México.	23
II. 2. 5. 1. 1 Valle de Nabogame, Chihuahua.	25
II. 2. 5. 1. 2 Valle de Guadiana, Durango.	25
II. 2. 5. 1. 3 Occidente de México.	26

II. 2. 5. 1. 4 El Bajío.	27
II. 2. 5. 1. 5 Valle de México y sureste de Puebla.	28
II. 2. 5. 1. 6 Cuenca del Balsas.	28
II. 2. 5. 2 Distribución del teocintle en Mesoamérica.	29
II. 2. 5. 2. 1 Nicaragua.	29
II. 2. 5. 2. 2 Guatemala.	30
II. 2. 6 Situación de las poblaciones del teocintle.	31
II. 3 El almidón.	32
II. 3. 1 Generalidades del almidón.	32
II. 3. 2 Estructura química.	35
II. 3. 2. 1 Amilosa.	35
II. 3. 2. 2 Amilopectina.	36
II. 3. 3 Caracterización estructural y fisicoquímica del almidón.	37
II. 3. 3. 1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).	37
II. 3. 3. 2 Microestructura y microscopía electrónica.	38
II. 3. 4 Buscando aplicación a los almidones.	40
II. 3. 4. 1 Consideraciones generales.	42
II. 3. 4. 1. 1 Consideraciones sensoriales.	42
II. 3. 4. 1. 2 Consideración del pH.	44
II. 3. 4. 1. 3 Consideraciones relacionadas con la fórmula.	45
II. 3. 4. 1. 4 Consideraciones de procesamiento.	45
II. 3. 4. 1. 5 Distribución y consideraciones finales de uso.	46
II. 3. 4. 2 Guía de selección de almidón.	47
III. HIPÓTESIS	49
IV. OBJETIVOS	50
IV. 1 General.	50
IV. 2 Específicos.	50

V. METODOLOGÍA	51
V. 1 Materiales.	51
V. 2 Métodos.	51
V. 2. 1 Caracterización del grano.	51
V. 2. 1. 1 Tamaño del grano.	51
V. 2. 1. 2 Dureza del grano.	51
V. 2. 1. 3 Comportamiento viscoelástico.	53
V. 2. 2 Extracción del almidón.	55
V. 2. 2. 1 Molienda.	55
V. 2. 2. 2 Desengrasado.	55
V. 2. 2. 3 Purificación del almidón.	56
V. 2. 3 Grado de cristalinidad por difracción de rayos X.	56
V. 2. 4 Propiedades térmicas.	56
V. 2. 4. 1 Calorimetría diferencial de barrido.	56
V. 2. 5 Propiedades estructurales.	57
V. 2. 5. 1 Dimensiones del cáscara y endospermo.	57
V. 2. 5. 2 Microestructura: microscopía electrónica de barrido de bajo vacío (ESEM).	58
V. 2. 5. 2. 1 Preparación de las muestras y condiciones de operación de ESEM.	58
V. 2. 5. 2. 2 Captación de imágenes.	59
V. 2. 5. 2. 3 Lectura y procesamiento de datos.	59
V. 3 Análisis estadístico.	60
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
VI. 1 Características físicas del grano.	61
VI. 2 Características mecánicas y viscoelásticas.	65
VI. 3 Propiedades estructurales y microestructurales.	74
VI. 4 Grado de cristalinidad por difracción de rayos X.	84
VI. 5 Propiedades térmicas.	90
VI. 6 Dendograma.	95

VII. CONCLUSIONES	97
VIII. BIBLIOGRAFÍA	98

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Nomenclatura usada en la clasificación de teocintle y maíz.	21
2	Clasificación del género Zea y su distribución (CONABIO, 2008c).	24
3	Términos comunes usados para describir productos alimenticios basados en almidón.	43
4	Diferentes razas de teocintle, utilizadas en el estudio.	52
5	Características físicas y visuales del grano entero de teocintle (con cáscara).	63
6	Características físicas del grano de teocintle sin cáscara.	63
7	Propiedades mecánicas y viscoelásticas de granos de teocintle con cáscara.	67
8	Propiedades mecánicas y viscoelásticas de granos de teocintle sin cáscara y la referencia de maíz.	70
9	Propiedades mecánicas y viscoelásticas del teocintle con cáscara acomodados por género.	73
10	Propiedades mecánicas y viscoelásticas del teocintle sin cáscara acomodados por género.	74
11	Propiedades estructurales del grano de teocintle y maíz.	76
12	Propiedades estructurales del grano de teocintle y maíz por género.	84
13	Porcentaje de cristalinidad del teocintle con la referencia del maíz.	86
14	Localización de los picos de los diferentes tipos de almidón de teocintle y de maíz de acuerdo a la medición de rayos X.	89
15	Propiedades térmicas del almidón de teocintle.	92
16	Propiedades térmicas del almidón de teocintle por género.	95



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	A) Planta de teocintle ( <i>Zea mays ssp. mexicana</i> ); C) Ejemplar de maíz cultivado ( <i>Zea mays ssp. mays</i> ); E) Espécimen de maíz cultivado mutante en el gen <i>tb1</i> (teosinte branched1) (Doebley, 2004).	4
2	Inflorescencia del <i>Tripsacum dactyloide</i> mostrando flores masculinas sobre flores femeninas en la misma espiga (Eubanks, 2001).	6
3	Idiograma paquiténico compuesto entre los de maíz y <i>Zea diploperennis</i> mostrando la gran diferencia entre ellos lo que indica que este teocintle no pudo ser el ancestro del maíz (Kato y col., 2009).	7
4	El origen de la mazorca del maíz por Transmutación Sexual Catastrófica. La banda sombreada indica la inflorescencia masculina; a la izquierda se presenta la condensación de las ramas laterales de las plantas de teocintle hasta la planta del maíz (Iltis, 1983).	8
5	Cápsula endurecida del teocintle Balsas ( <i>Z. mays ssp. parviglumis</i> ), normal y mutado: (a, b) fruto normal del teocintle balsas, se muestra con el raquis invaginado, la gluma rodea al grano; (c, d) fruto mutado por el gen <i>tga1</i> , el grano se presenta expuesto (Iltis, 2000).	9
6	Mapa de México con las localizaciones de los centros de origen-domesticación y los centros de diversificación primaria del maíz (Kato y col., 2009).	11
7	Idiograma paquiténico compuesto de los teocintles anuales mexicanos y maíz mostrando las posiciones de nudos encontrados en ambas especies indicando que todas las posiciones de nudo del maíz se encuentran en el teocintle y éste posee trece posiciones	12

	adicionales (Kato y col., 2009).	
8	Localización de los sitios de colecta de las razas de maíz (puntos en amarillo) y teocintles (puntos en rojo) en México.	14
9	Teocintle anual mexicano (izquierda), con ramificaciones les dan un aspecto similar a un candelabro por la forma en que crece, lo cual difiere del maíz (derecha) (Doebley, 1992).	17
10	Mazorcas del teocintle, normal y mutado, y espiga. Inflorescencias (a-c) femeninas (mazorca) y (e) masculinas (espiga) de <i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> , raza Chalco, teocintle anual del Valle de México: (a) vista de frente de la mazorca, (b) vista de lado de la mazorca, (c) sección longitudinal de (b) mostrando el grano cubierto con una cascara. Las inflorescencias cuentan con: zona de abscisión (ab), segmentos de raquis (ra), gluma externa (og), germen (em), y endospermo (en), en la espiga también se encuentra gluma interna (ig). Sección horizontal de la mazorca (f): en el teocintle los granos están acomodados de uno en uno en las cúpulas, en el maíz se presentan de dos en dos de una sola cúpula de poca profundidad. La cúpula del teocintle (g) se forma a partir del entrenudo del raquis invaginado (RA), la gluma exterior (OG) sella la apertura de la cúpula, por lo que oculta el núcleo de la vista (Lauter y Doebeley, 2002; Iltis, 2000; Doebley, 2003).	18
11	Distribución geográfica de las poblaciones de teocintle en México y Mesoamérica.	23
12	Distribución de teocintle en México (Sánchez y Ruiz, 1996).	25
13	Teocintle Durango, el de la derecha es la espiga y el de la izquierda es la mazorca (Collins, 1921).	26
14	En esta ilustración muestra una hoja, una espiga y una mazorca (granos con forma trapezoidal) del teocintle <i>Zea perennis</i> del estado de Jalisco, Mexico. (Collins, 1921).	27
15	Tallos de teocintle Chalco recolectado en las orillas del poblado de	28

	Chalco. Las hojas han sido removidas del tallo de la izquierda, exponiendo la mazorca (Collins, 1921).	
16	Distribución de poblaciones de teocintle en Nicaragua (Loáisiga y col, 2010).	29
17	Mapa mostrando los sitios de colección del teocintle en Guatemala (Smith y col., 1981).	30
18	Teosinte Guatemala, se asemeja en algunas características al género <i>Tripsacum</i> (Wilkes, 1977).	31
19	Registros históricos de teocintle (antes de 2007 en círculos naranja) e información 2007-2008 (círculos azules) (CONABIO, 2008a).	32
20	Estructura de a) Amilosa y b) Amilopectina (Adaptado de Tester y col., 2004).	36
21	Dimensiones del grano de teocintle con cascara: a) largo, b) alto y c) ancho.	50
22	Dimensiones del grano de teocintle sin cascara: a) largo, b) alto y c) ancho.	50
23	Medición de compresión con el texturómetro TA-XT2 los granos de teocintle.	52
24	Ciclo de compresión. Carga (P); carga máxima ( $P_m$ ); $W_P$ trabajo plástico; $W_E$ trabajo elástico realizado (Ponce y col., 2008).	53
25	Granos de teocintle colocados en un tubo de ensayo, para su posterior molienda en un mortero de ágata.	54
26	Equipo para difracción de rayos X.	56
27	Equipo de calorimetría diferencial de barrido y termograma característico.	56
28	Imágenes: a) estereoscopio, b) granos de teocintle fijados y pulidos en acrílico, y c) vista del grano de teocintle con el estereoscopio.	57
29	Microscopio electrónico XL30 PHILIPS.	58
30	Dimensiones del grano de teocintle con cáscara de la raza <i>Zea</i>	62

	<i>mays ssp. parviglumis.</i>	
31	Dimensiones del grano de teocintle sin cáscara de la raza <i>Zea mays ssp. parviglumis.</i>	62
32	Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8784 (Balsas: <i>Zea mays ssp. parviglumis</i> ) con cáscara deformación mayor.	66
33	Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8753 (Chalco: <i>Zea mays ssp. mexicana</i> ) con cáscara con deformación menor.	68
34	Cápsula endurecida del teocintle Balsas ( <i>Z. mays ssp. parviglumis</i> ), normal y mutado: (a) fruto normal, se muestra con el raquis invaginado, la gluma rodea al grano; (b) el grano se presenta expuesto, se observa más claramente las cáscaras que envuelven al grano (Iltis, 2000).	69
35	Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8784 (Balsas: <i>Zea mays ssp. parviglumis</i> ) grano pequeño.	71
36	Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8753 (Chalco: <i>Zea mays ssp. mexicana</i> ) grano grande.	72
37	Fotografías tomadas en el estereoscopio: a) muestra 8785 Balsas ( <i>Zea mays ssp. parviglumis</i> ); b) muestra 9476 ( <i>Zea diploperennis</i> ). Indicando el endospermo (en) y el germen (em).	75
38	Partes de la mazorca de teocintle: zona de absición (ab), raquis (ra), gluma externa (og), germen o embrión (em) y en dospermo (en) (Iltis 1983; Iltis 2000).	75
39	Imagen del tamaño del gránulo de almidón de la muestra 13567 ( <i>Zea mays ssp. parviglumis</i> ), mostrando figuras poliédricas.	77
40	Imagen del tamaño del gránulo de almidón de la muestra 8837 ( <i>Zea perennis</i> ).	77
41	Gránulos de almidón de maíz y teocintle. a) almidón de <i>Zea mays ssp. parviglumis</i> , la mayoría de los gránulos son de forma ovalada (Ov) a redonda (R), no son irregulares, las esferas pequeñas son lípidos (O); b) granos de almidón de <i>Zea mays ssp. mexicana</i>	80

(Chalco), tiene una proporción grande de granos como en el maíz, con diferencias, forma irregular (Irr) y mas gotas de lípidos (O); c) almidón de maíz raza Reventador, con forma irregular, ovalada y redonda, observándose fisuras; d) almidón de maíz raza Bolita (Holst y col., 2007).

42	<i>Zea luxurians</i> muestra 9478, mostrando algunas mediciones del gránulo de almidón.	81
43	<i>Zea mays ssp. mexicana</i> muestra 13565.	81
44	¿Usaron los Aztecas al teocintle para hacer pop-corn? Semillas de teocintle antes y después del explotado, sugiere que los Americanos usaron al teocintle como alimento Breadle (1939).	82
45	Muestra 8837 ( <i>Zea perennis</i> ).	83
46	Muestra 8785 (Balsas: <i>Zea mays ssp. parviglumis</i> ).	83
47	Patrones de difracción de rayos X, para diferentes almidones (Zobel, 1988).	85
48	Patrones de difracción de rayos X de teocintle, maíz y amilopectina; se observan los picos con ángulo de $2\theta$ de 17.8, 19.9, 20.7 y 26.6°.	87
49	Patrones de difracción de rayos X, la muestra de teocintle 10003 ( <i>Zea diploperennis</i> ) es en el que se observa la mayor intensidad del pico con ángulo de $2\theta$ de 23.5° correspondiente al complejo amilosa-lípido.	88
50	Comportamiento térmico: el teocintle <i>Zea luxurians</i> (13451) Ti de 67.11 °C y <i>Zea diploperennis</i> (10003) Ti de 60.88 °C; para el maíz Chapalote Ti de 67.27 °C y el maíz palomero Ti de 63.92 °C.	93
51	Comportamiento térmico de las diferentes razas acomodados por la temperatura de inicio de gelatinización: 861- <i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i> , 9478- <i>Zea luxurians</i> , 9479- <i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> , 420532- <i>Zea nicaraguensis</i> , 16795- <i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> , 9475- <i>Zea perennis</i> , 9477- <i>Zea mays</i> ssp.	94

*parviglumis* y 9476-*Zea diploperenis*.

- 52 Dendograma de los promedios del teocintle y maíz con el método 96  
de varianza mínima (Ward), indicando cuatro clusters.

## RESUMEN

El teocintle es una planta nativa de México y América Central; es el ancestro del maíz cultivado (*Zea mays* ssp. *mays* L.), y actualmente es la teoría más aceptada por diversos autores. El teocintle representa una importante fuente para el mejoramiento del maíz, aunque esta capacidad no ha sido usada extensivamente; su aplicación es solo como forraje, por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar propiedades físicas, mecánicas y viscoelásticas del grano, así como morfológicas y térmicas del almidón del teocintle, y así poder darle una aplicación al almidón en la industria. Para este estudio se utilizaron veinticuatro muestras del género *Zea*, entre estas se encuentran *Zea mays* ssp. *mays* o maíz cultivado; *Zea mays* ssp. *paraviglumis* (teocintle Balsas); *Zea luxurians* (teocintle Guatemala); *Zea mays* ssp. *huehuetenanguensis* (teocintle Huehuetenango); *Zea mays* ssp. *mexicana* (teocintle Durango, Chalco y Mesa Central); *Zea diploperennis*; *Zea perennis*; *Zea nicaraguensis*. Las propiedades mecánicas y viscoelásticas del grano fueron evaluadas con un analizador de textura (TA-XT2 Texture Analyzer). Las propiedades microestructurales y térmicas del almidón fueron medidas con microscopía electrónica de barrido de bajo vacío (ESEM) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), además de medir rayos X de cada muestra de almidón para distinguir la estructura cristalina. Se encontraron que los granos de teocintle presentan un modulo de elasticidad alto y observando la forma y compactación de los gránulos de almidón, el teocintle solo está compuesto de almidón duro. Además muestra temperaturas de gelatinización bajas en comparación con el almidón del maíz, por lo que se sugiere que está involucrado el tamaño del gránulo de almidón, es decir gránulos pequeños presentan menor temperatura de gelatinización y viceversa. Pero sin embargo para dar un uso específico de este material en la industria alimentaria y no alimentaria, se tiene que profundizar el estudio.

## I. INTRODUCCIÓN

El maíz es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal. El origen y la evolución del maíz han sido un misterio porque el maíz ha llegado a nosotros altamente evolucionado, sin conocerse formas intermedias. A pesar de extensivas búsquedas de las formas silvestres de esta planta, no ha sido encontrada alguna.

El teocintle está considerado como un pariente del maíz (*Zea mays* L. *ssp. mays*), es la teoría más aceptada la cual dice que el maíz se origino del teocintle (Beadle, 1939, 1972, 1977, 1978, 1980; Galinat 1971, 1977, 1978, 1992, 1995; de Wet y Harlan, 1972, 1976; Iltis 1972, 1983, 1988; Kato 1976, 1984; Doebley 1983 , 2004; Doebley y col., 1984, 1987; Dorweiler y Doebley. 1997; Sundberg y Orr, 1986, 1990; Matsuoka y col., 2002). Sin embargo, la composición genética del teocintle demuestra características anatómicas y fisiológicas distintas al maíz común como: la forma de las mazorcas, la dureza del grano, la morfología de las semillas. El teocintle se distingue fácilmente del maíz, debido a que presenta ramificaciones y numerosas inflorescencias femeninas pequeñas (mazorca), con una estructura dística y una estructura polística en el maíz. En el teocintle la gluma exterior es dura y junto con el raquis forma la cápsula que rodea la semilla, en la madurez el raquis se rompe con facilidad, y los frutos se dispersan. En el maíz la gluma es suave, es más pequeña que el fruto, así los frutos pueden verse cuando la mazorca queda libre de las hojas que la protegen, sin embargo los frutos no se pueden dispersar sin la ayuda del humano.

La utilidad como valor económico que tiene el teocintle es como forraje. En estos últimos años solo se han realizado estudios en el conocimiento de la diversidad genética y en las relaciones filogenéticas del teocintle (Iltis y col., 1979), así como su distribución natural en México, Guatemala y Nicaragua (Sánchez y Ruiz, 1996). Por lo cual es importante hacer diferentes estudios, para conocer la utilidad que se le puede dar al grano o almidón del teocintle.



## II. ANTECEDENTES

### II. 1 Maíz.

El maíz es una planta muy evolucionada productora de una mazorca perfecta, cuyo origen ha recibido mucha atención en los últimos cien años y ha dado lugar a debates entre los científicos. El maíz es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal. El origen del maíz ha sido un misterio porque ha llegado a nosotros totalmente evolucionado, sin conocerse formas intermedias. A pesar de extensivas búsquedas de las formas silvestres de esta planta, no han sido encontradas. Mientras que los cereales del Viejo Mundo tienen variedades silvestres que se preservan en la naturaleza, el maíz es conocido solamente por la especie cultivada (*Zea mays* L.); el ancestro silvestre, el teocintle, es también su pariente cercano (Figuroa y Aguilar, 1997). Por otro lado, Mangelsdorf y col. (1964) aseguraron que el maíz que conocemos es una planta cuidadosamente domesticada y es la más eficiente de todos los pastos en la producción de granos y es, a su vez, incapaz de sobrevivir sin la ayuda humana debido a que no hay forma de dispersar su semilla.

#### II. 1. 1 Descripción botánica del maíz.

El maíz es una planta de porte robusto; el tallo es simple, erecto, de elevada longitud alcanzando alturas de 1-5 m, con pocas ramificaciones, su aspecto concuerda al de una caña de azúcar por la presencia de nudos y entrenudos y su médula esponjosa. Las hojas nacen en los nudos de manera alterna a lo largo del tallo; se encuentran abrazadas al tallo mediante la vaina que envuelve el entrenudo y cubre la yema floral, de tamaño y ancho variable. Las raíces primarias son fibrosas presentando además raíces adventicias, que nacen en los primeros nudos por encima de la superficie del suelo, ambas tienen la misión de mantener a la planta erecta.

Es una planta monoica de flores unisexuales, que presenta flores masculinas y femeninas bien diferenciadas en la misma planta: la inflorescencia masculina es terminal, se conoce como panícula (o espiga) consta de un eje central o raquis y

ramas laterales; a lo largo del eje central se distribuyen los pares de espiguillas de forma polística y en las ramas con arreglo dístico y cada espiguilla está protegida por dos brácteas o glumas, que a su vez contienen en forma apareada las flores estaminadas; en cada florecilla componente de la panícula hay tres estambres donde se desarrollan los granos de polen. La coloración de la panícula está en función de la tonalidad de las glumas y anteras, que pueden ser de coloración verde, amarilla, rojiza o morada. Las inflorescencias femeninas (mazorcas) se localizan en las yemas axilares de las hojas, son espigas de forma cilíndrica que consisten de un raquis central u olote donde se insertan las espiguillas por pares, cada espiguilla con dos flores pistiladas una fértil y otra abortiva, estas flores se arreglan en hileras paralelas, las flores pistiladas tienen un ovario único con un pedicelo unido al raquis, un estilo muy largo con propiedades estigmáticas donde germina el polen. La inflorescencia femenina (mazorca) puede formar alrededor de 400 a 1000 granos arreglados en promedio de ocho a 24 hileras por mazorca; todo esto encerrado en numerosas brácteas o vainas de las hojas (totomoxtle), los estilos largos saliendo de la punta del raquis como una masa de hilo sedoso se conocen como pelo de elote; el jilote es el elote tierno. Por las características mencionadas, el maíz es una planta de polinización abierta (anemófila) propensa al cruzamiento, la gran mayoría de los granos de polen viajan de 100 a 1000 m (Jugenheimer, 1988).

En la mazorca cada grano o semilla es un fruto independiente llamado cariósipide que está insertado en el raquis cilíndrico u olote; la cantidad de grano producido por mazorca está limitada por el número de granos por hilera y de hileras por mazorca. Como cualquier otro cereal, las estructuras que constituyen el grano del maíz (pericarpio, endospermo y embrión) le confieren propiedades físicas y químicas (color, textura, tamaño, etc.) que han sido importantes en la selección del grano como alimento (Kato y col., 2009).

El maíz cultivado es una planta completamente domesticada, el hombre y el maíz han vivido y han evolucionado juntos desde tiempos remotos. El maíz no crece en

forma salvaje y no puede sobrevivir en la naturaleza, siendo completamente dependiente de los cuidados del hombre.

## II. 1. 2 Teorías sobre el origen del maíz.

El controvertido tema del origen del maíz empezó a finales del siglo XIX cuando Ascherson en 1895 (Mangelsdorf y Reeves, 1939) propuso la hipótesis de que el teocintle era el ancestro del maíz (Figura 1). Posteriormente, varias teorías fueron propuestas sobre este tópico. Sin embargo, después de dos décadas Goodman (1988) hizo una nueva revisión de la literatura sobre la historia y evolución del maíz y encontró que a pesar de muchos estudios hechos y propuestas de teorías hasta entonces, todavía no existía un consenso acerca de cómo y dónde ocurrió el origen y evolución temprana del maíz. El único avance real que ha ocurrido en ese lapso de tiempo ha sido el llegar a un gran consenso de que el teocintle y, en especial el teocintle anual mexicano, es el ancestro del maíz cultivado (Kato y col., 2009).

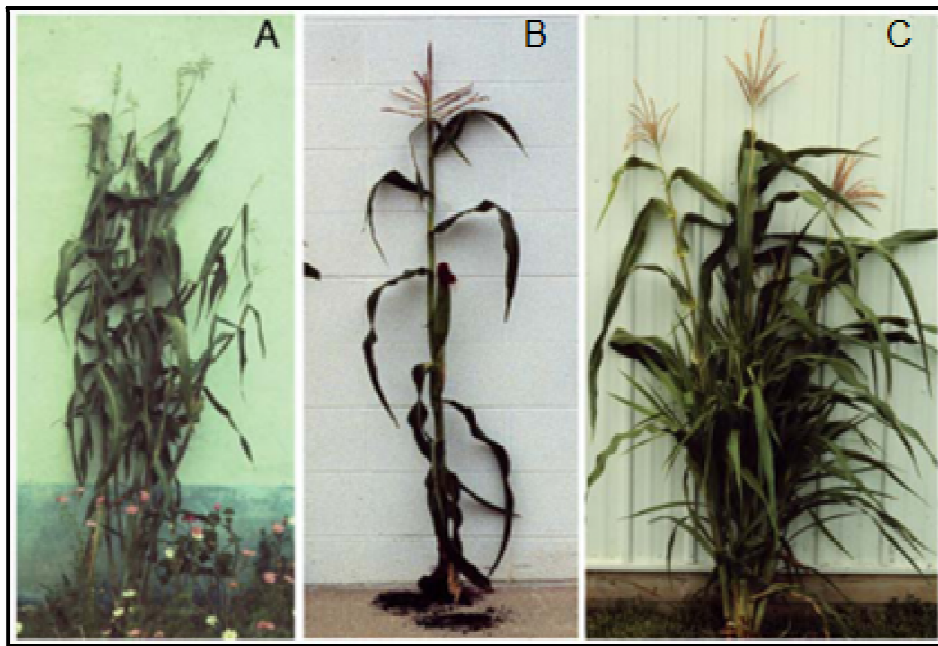


Figura 1. A) Planta de teocintle (*Zea mays* ssp. *mexicana*); B) Ejemplar de maíz cultivado (*Zea mays* ssp. *mays*); C) Espécimen de maíz cultivado mutante en el gen *tb1* (teosinte branched1) (Doebley, 2004).

Desde las primeras exploraciones en México, para Nikolai Vavilov (géneta ruso más importante del siglo XX) fue evidente que *Euchlaena*, género en el que antiguamente se clasificó al teocintle, era el pariente silvestre más cercano del maíz, fue nativo de México (Wilkes, 1972).

#### II. 1. 2. 1 Teoría tripartita.

La teoría tripartita considera: a) que existió un maíz silvestre tunicado y reventador; b) que el teocintle se originó del híbrido entre ese maíz silvestre y el *Tripsacum*; y c) que el maíz cultivado actualmente es el producto de la introgresión de genes de *Tripsacum* al maíz silvestre mediante cruzamientos frecuentes con el teocintle (Mangelsdorf y Reeves, 1939; Mangelsdorf, 1974); después de sufrir varios cambios y a partir de que se descubrió el teocintle perenne diploide (*Z. diploperennis*) en Jalisco (Guzmán, 1978; Iltis y col., 1979) ahora se postula que los teocintles anuales se originaron de cruzamientos entre el maíz silvestre y *Z. diploperennis* y de estos híbridos también se originaron los maíces cultivados actuales (Wilkes, 1979; Mangelsdorf y col., 1981).

#### II. 1. 2. 2 El teocintle: ancestro del maíz.

La teoría que postula que el teocintle anual mexicano, y solamente esta planta, fue el ancestro del maíz cultivado, el cual fue originado mediante el proceso de domesticación llevada a cabo por la intervención humana, actualmente es la teoría general más aceptada (Beadle, 1939, 1972, 1977, 1978, 1980; Galinat, 1971, 1977, 1978, 1992, 1995; de Wet y Harlan, 1972, 1976; Iltis 1972, 1983, 1988; Kato, 1976, 1984; Doebley, 1983, 2004; Doebley y col., 1984, 1987; Dorweiler y Doebley, 1997; Sundberg y Orr, 1986, 1990; Matsuoka y col., 2002).

Sin embargo, aún cuando todos aceptan que el maíz fue originado a partir del teocintle, han habido diversas maneras de visualizar el cómo una planta con inflorescencias femeninas pequeñas, con pocos “granos” dispuestos de forma dística que se desarticulan a su madurez, pudo haber dado origen a otra planta cuyas inflorescencias femeninas son mucho mayores, polísticas, es decir con numerosas hileras de muchos granos en cada una, sobre un raquis masivo (olote)

que no se desarticula a su madurez. Este problema ha quedado resuelto, parcialmente, por los estudios de Beadle (1972, 1980), Doebley y col., (1990), Doebley y Stec (1991), y Dorweiler y Doebley (1997) que mostraron que las diferencias morfológicas entre las inflorescencias femeninas del maíz y teocintle son debidas a unos cinco genes. Sin embargo, Randolph (1976), considerando las revisiones previas de Mangelsdorf (1947), Mangelsdorf y Reeves (1939) y Galinat (1970, 1971), indica que la genética de las diferencias entre maíz y teocintle es mucho más compleja que la conclusión a la que llegó Beadle (1972). Además, considera que muchas de esas diferencias son de índole poligénica. En esta situación también deberían ser considerados muchos genes modificadores como el gen *tga1* (teosinte glume architecture1) estudiado por Dorweiler y Doebley (1997).

#### II. 1. 2. 3 Teoría *Tripsacum diploperennis*.

A pesar de lo anterior, aún existe quienes sostienen que el maíz ha sido el resultado de la hibridación del *Tripsacum* (Figura 2) con el *Zea diploperennis* (Eubanks, 1995, 2001). Ambos taxones son perennes y no existe ningún maíz con esta característica, con la sola excepción del obtenido artificialmente mediante el cruzamiento y selección entre el maíz y *Zea perennis* (Rhoades y Dempsey, 1966).

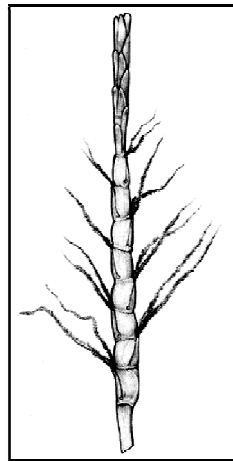


Figura 2. Inflorescencia del *Tripsacum dactyloide* mostrando flores masculinas sobre flores femeninas en la misma espiga (Eubanks, 2001).

Por otro lado, el número y morfología cromosómicas son completamente diferentes lo que hace improbable que de esa manera se pueda formar el maíz: en todo caso resultaría en la introgresión de genes de *Tripsacum* a *Z. diploperennis* después de varios ciclos de retrocruzamiento del híbrido a este teocintle, pero difícilmente se obtendría maíz tal como lo conocemos. No solamente el número de cromosomas que forman el genoma tanto de maíz como de los *Tripsacum* spp., sino que también el hecho de que en el maíz predominan los nudos intercalares y tanto en *Tripsacum* spp. como en *Z. diploperennis* solamente se encuentran nudos terminales en todos sus cromosomas (Figura 3). Existe una amplia información que contradice las aseveraciones anteriores de Eubanks (Rhoades y Dempsey, 1953; Tantravahi, 1968; Galinat, 1970, 1971, 1973; de Wet y col., 1972; Kato, 1976; Kato y López, 1990; Bennetzen y col., 2001).

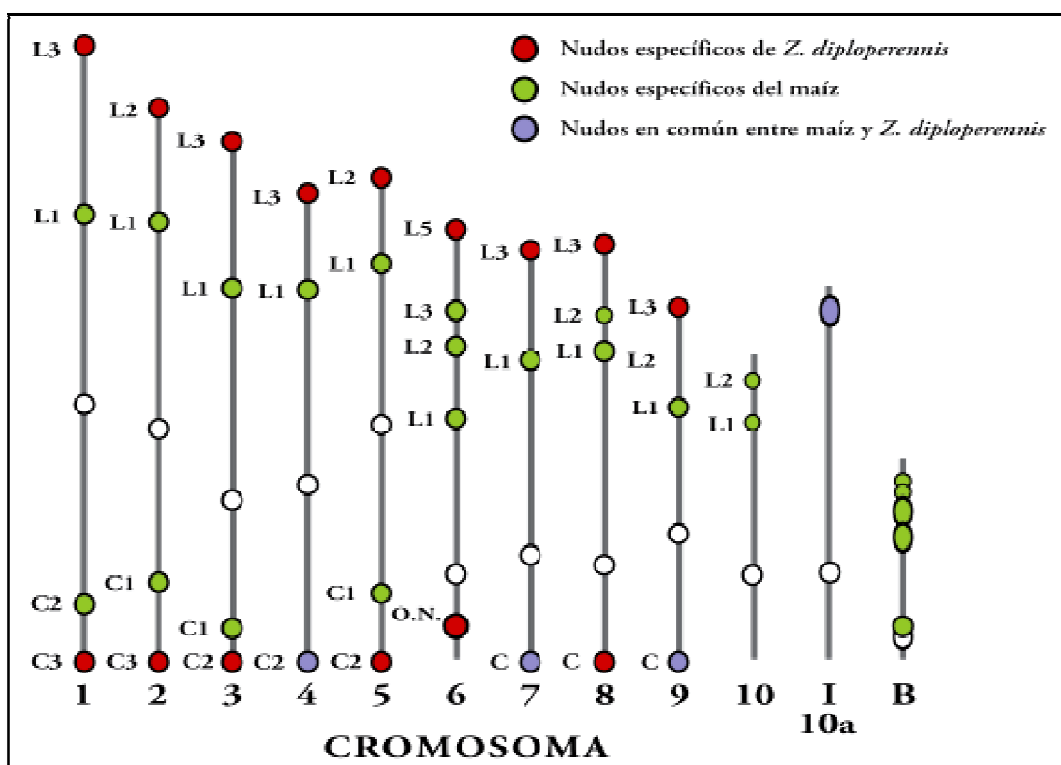


Figura 3. Idiograma paquiténico compuesto entre los de maíz y *Zea diploperennis* mostrando la gran diferencia entre ellos lo que indica que este teocintle no pudo ser el ancestro del maíz (Kato y col., 2009).

#### II. 1. 2. 4 Teoría de la transmutación sexual catastrófica.

Tomando como base que el teocintle es el ancestro del maíz, Iltis (1983) desarrolló la teoría que denominó “Transmutación Sexual Catastrófica”.

La cual propone que el maíz evolucionó mediante una transmutación sexual epigenética que consistió en la condensación de las ramas laterales de las plantas de teocintle de manera que las inflorescencias masculinas (espigas) entran en la zona hormonal de expresión femenina que indujo la feminización de sus espiguillas (Figura 4); conforme la condensación continúa la feminización de las flores masculinas y por la dominancia apical de la espiga feminizada las inflorescencias femeninas laterales desaparecen; a la vez que ocurre lo anterior, la rama terminal (apical) de la espiga es la que se feminiza y las ramas primarias y secundarias tienden a desaparecer; todas estas modificaciones, iniciadas por factores ambientales (en este caso se supone la presencia de hormonas balanceadas entre citocininas y giberelinas), posteriormente son “asimiladas genéticamente” de acuerdo a Waddington (1953).

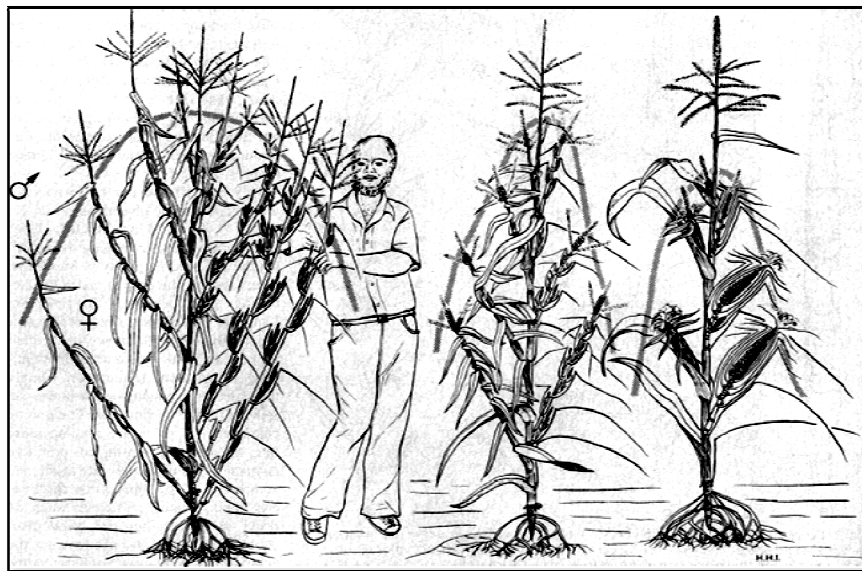


Figura 4. El origen de la mazorca del maíz por Transmutación Sexual Catastrófica. La banda sombreada indica la inflorescencia masculina; a la izquierda se presenta la condensación de las ramas laterales de las plantas de teocintle hasta la planta del maíz (Iltis, 1983).

Además, existe un problema desde un principio para que estas series de eventos propuestas por Iltis (1983) puedan ocurrir. El hecho de que las ramas laterales terminadas en una inflorescencia masculina, la espiga, reduzca su longitud no indica que dicha inflorescencia masculina pueda invadir la zona hormonal, esto es así porque en cada rama esta zona siempre estaría debajo de la espiga, no importa cuánto se reduzca la rama. En otras palabras, lo que se reduce es el tamaño de la zona hormonal en cada rama lateral pero la relación de la inflorescencia masculina con esta zona se mantiene intacta. Por otro lado, se ha encontrado el gen *tga1* (teosinte glume architecture 1) que afecta varias características de la cápsula de grano del teocintle (longitud del segmento de raquis que forma la cúpula y sus alas laterales, la longitud y endurecimiento de la gluma que cierra la cúpula, longitud del pedicelo de la espiguilla); este gen en el maíz (*tga1*), se ha modificado formando cúpulas más cortas y menos invaginadas, de tal manera que el grano no cabe en la cúpula y queda expuesto a la madurez (Figura 5). La textura de la gluma ahora es coriácea y flexible en lugar de estar endurecida y lignificada como en el teocintle. Este descubrimiento proporciona evidencia de que la mazorca del maíz fue derivada de la mazorca del teocintle por una serie de modificaciones, y no de la inflorescencia terminal de las ramas del teocintle (Dorweiler y col., 1993; Dorweiler y Doebley, 1997).

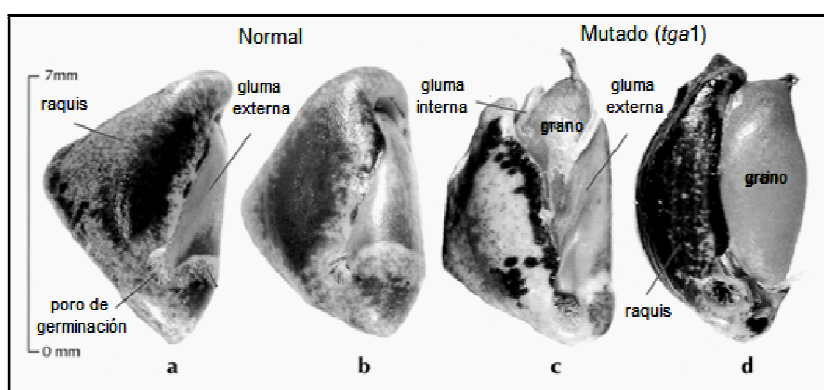


Figura 5. Cápsula endurecida del teocintle Balsas (*Z. mays* ssp. *parviglumis*), normal y mutado: (a, b) fruto normal del teocintle balsas, se muestra con el raquis invaginado, la gluma rodea al grano; (c, d) fruto mutado por el gen *tga1*, el grano se presenta expuesto (Iltis, 2000).



## II. 1. 2. 5 Teoría multicéntrica del origen del maíz.

Con base en los resultados de un amplio estudio de la morfología de los cromosomas de los maíces y teocintles de América se desarrolló una teoría que propone que el maíz fue originado y domesticado en varias regiones entre México y Guatemala; es decir, que este cultivo tuvo un inicio multicéntrico habiéndose determinado cinco centros de domesticación, con base en patrones de distribución muy particulares de algunos nudos específicos localizados en varios cromosomas: 1) Mesa Central de México (Figura 6-1), que dio origen al maíz primigenio que se le ha dado el nombre de Complejo Mesa Central; 2) región de altura media en los estados de Morelos, México, Guerrero y sus alrededores, que desarrolló el Complejo Pepitilla (Figura 6-2); 3) la región centro-norte de Oaxaca que originó el Complejo Tuxpeño (Figura 6-3); 4) el territorio comprendido entre los estados de Oaxaca y Chiapas, del cual resultó el germoplasma denominado Complejo Zapalote (Figura 6-4) y 5) la región alta de Guatemala, del cual surgió el germoplasma que se denominó Complejo Altos de Guatemala (Figura 6-5) (McClintock, 1978; McClintock y col., 1981; Kato, 1984, 2005).

Se propone que estos complejos de nudos cromosómicos migraron a lo largo de rutas diferentes y definidas conforme se incrementó su cultivo en su lugar de origen y domesticación. De esta forma hubo regiones en que convergieron las rutas de migración de dos o más complejos de nudos cromosómicos de cuya hibridación y selección posterior surgieron nuevas razas de maíz. Se supone que entre mayor fue el número de complejos que originalmente se juntaron en una región dada, mayor fue el número de razas que emergieron (Figura 6). Se entiende como sitio de origen al lugar geográfico en que se desarrollaron plantas incipientes de maíz, mediante selección natural, en las poblaciones de teocintle durante el periodo de predomesticación. Cuando el hombre encuentra estas plantas de maíz y las empieza a cultivar en aislamiento, entonces se considera que se inicia el proceso de domesticación. En otras palabras, el final del proceso de predomesticación es el inicio de domesticación; en este momento coinciden origen y domesticación (Kato y col., 2009).



Figura 6. Mapa de México con las localizaciones de los centros de origen-domesticación y los centros de diversificación primaria del maíz (Kato y col., 2009).

## II. 1. 2. 6 Teoría unicéntrica del origen del maíz.

Matsuoka y col. (2002) propusieron que las poblaciones del teocintle de la raza Balsas o subespecie (ssp.) *parviglumis* localizadas en el centro de la cuenca del Balsas (oriente de Michoacán, suroeste del estado de México y norte de Guerrero) dieron origen al maíz. Además, concluyen que el maíz tuvo un origen unicéntrico, y que surgió en la parte central de la cuenca del río Balsas, en Michoacán, Guerrero, y México, siendo, por lo tanto, monofilético a partir del teocintle raza Balsas o *Z. mays* ssp. *parviglumis*. Fukunaga y col. (2005) hacen un estudio similar al de Matsuoka y col. (2002); en el cual, hacen un análisis de estructura poblacional y encuentran que el 48% de las plantas de ssp. *parviglumis* estudiadas tienen un contenido de un 25% o más de germoplasma de maíz; esto último lo interpretan como una consecuencia del origen reciente del maíz a partir de este teocintle. En



Además Matsuoka y col. (2002), postularon que solamente la raza Balsas o *Z. mays* ssp. *parviglumis* fue la que dio origen al maíz; sin embargo, Fukunaga y col. (2005) encontraron que la ssp. *parviglumis*, a la vez que originó al maíz, también formó lo que ahora se conoce como raza Chalco y Mesa Central o ssp. *mexicana*; si, hubo un periodo de evolución del teocintle en el que se expandió su distribución geográfica y en ese periodo ocurrió la diversificación en otra subespecie, la ssp. *mexicana*, también pudo haber originado la variación genética de plantas con cúpulas de doble grano. Si esto ocurrió así, entonces esta nueva raza o subespecie también pudo haber sido parte del primer paso hacia la posibilidad del origen múltiple del maíz (Galinat, 1963, 1970, 1988 y 1995).

Lo antes discutido indica que los resultados de Matsuoka y col. (2002) pueden ser interpretados de forma alterna a la que ellos dieron, de acuerdo a lo que obtuvieron en el análisis de microsatélites en muestras de maíz y teocintle. De esta forma los resultados de varios investigadores (Doebley, 1990, 2004; Galinat, 1963, 1970, 1988, 1995; McClintock, 1978; McClintock y col., 1981; Kato, 1984; Benz, 2001; Matsuoka y col., 2002; y Fukunaga y col., 2005) pueden ser integrados en una sola teoría sobre el origen del maíz que serviría como punto de partida para futuras investigaciones. Posiblemente Wilkes (2004) tiene razón al decir que conocemos muchos aspectos sobre el teocintle y el maíz, pero en realidad no conocemos cómo se originó el maíz a partir del teocintle.

De acuerdo a Warburton y col. (2011), concluyen que tanto el teocintle *Zea mays* ssp. *parviglumis* como el Chalco han sido importantes contribuyentes en la post-domesticación en los genes del maíz, y han sido una importante fuente de nuevos alelos en el maíz dentro de los pasados 200 años.

## II. 1. 3 Distribución del maíz y su pariente silvestre.

La Figura 8 muestra la distribución de maíz y teocintle, basándose en las colectas de maíz resguardadas en los bancos de germoplasma (hasta 1995, aproximadamente) y que fueron resultado de las primeras exploraciones para sistematizar las razas de maíz. Además, se incluyen las colectas más recientes

reportadas en los proyectos de la Comisión y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2008a). En esta proyección se observa que la mayor diversidad de maíz se concentra en la mesa central (Kato y col., 2009).

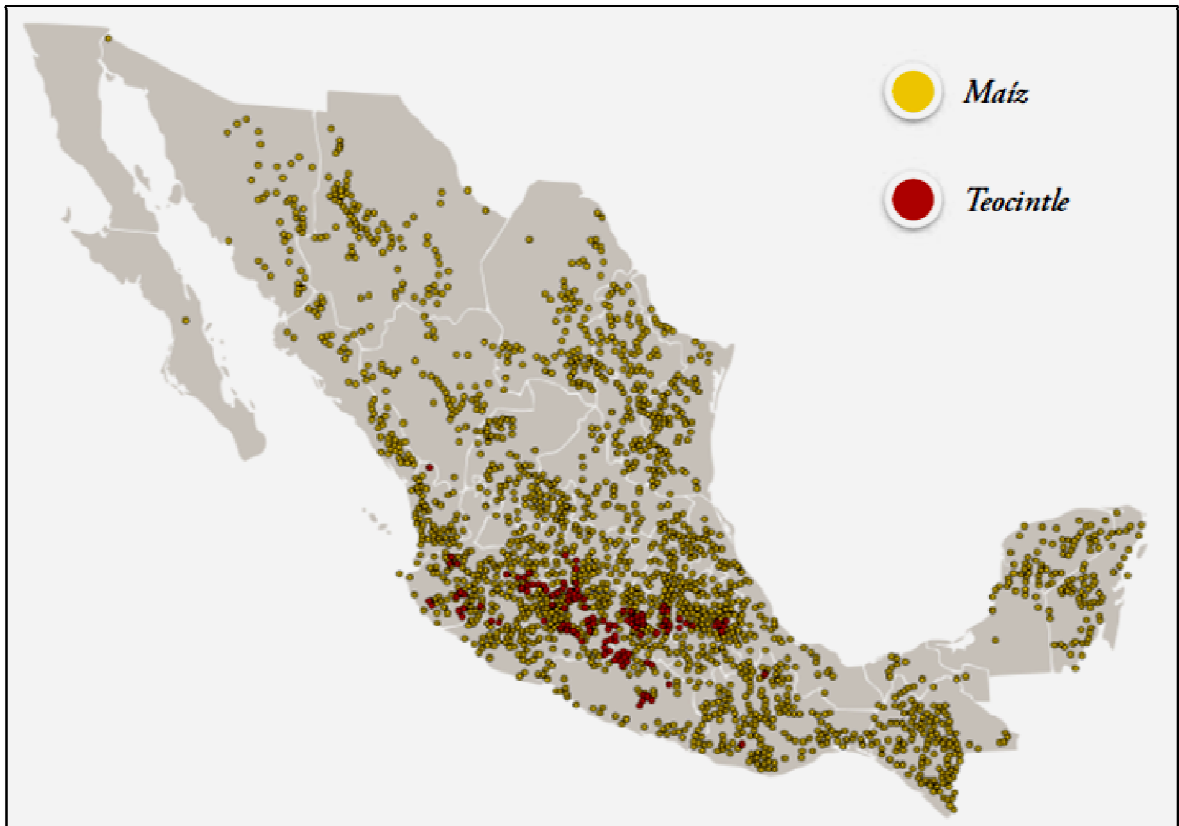


Figura 8. Localización de los sitios de colecta de las razas de maíz (puntos en amarillo) y teocintles (puntos en rojo) en México.

El teocintle ha sido considerado desde el siglo pasado como una especie con potencial forrajero en la alimentación animal para las regiones tropicales y subtropicales; con base en estudios de calidad, potencial rendimiento y a sus mecanismos de dispersión y establecimiento. Adicionalmente, se considera un germoplasma valioso para el mejoramiento del maíz, especialmente en lo que respecta a resistencia a enfermedades y factores adversos (Reeves, 1950; Nault y Findley, 1981; Nault y col., 1982; Doebley, 1983; Cohen y Galinat, 1984; Guzmán y Iltis, 1991).

En la Norma Oficial Mexicana SEMARNAT 2001, NOM-059-ECOL-1994, se encuentra un listado de las especies y subespecies de la flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y sujetas a protección especial. En la lista figura *Zea perennis* como especie en peligro de extinción y *Zea diploperennis* como especie amenazada. Aún cuando no se mencionan los teocintles anuales, deben ser considerados bajo el concepto de sujetas a protección, debido a que el teocintle es considerado como maleza en algunas partes de México y los agricultores prefieren erradicarlo. Se mantiene en algunos campos de cultivo porque los agricultores no dedican mucho esfuerzo en la limpieza de malezas. Pero podría presentarse por la introducción de herbicidas en algún paso del sistema agrícola puede dar lugar a la erradicación de esta maleza (y la extinción local del teocintle). En el área de Chalco, el teocintle es mantenido porque es usado como forraje, las semillas del teocintle sobreviven en el tracto intestinal del ganado, y el abono es usado para la fertilización de nuevos campos de cultivo. A través de este manejo es fácil que nuevas poblaciones de teocintle se establezcan e invadan los nuevos campos. Sin embargo, cambios nuevos como el uso de fertilizantes químicos o herbicidas seguramente restringirán la presencia del teocintle (Kato y col., 2009).

## II. 2 Teocintle.

El teocintle es el nombre común que agrupa plantas herbáceas con hábitos perennes y anuales del género *Zea* nativo de México y América Central. Las plantas del teocintle son altas y de hoja ancha como la mayoría de las gramíneas. Este crecimiento en general es similar al del maíz, aunque este tiene ramas laterales de tallos erectos ramificados, de elevada longitud alcanzando alturas de dos a seis metros, presenta entrenudos sólidos con tejido parenquimatoso (Doebley, 2004; Kato y col., 2009). Algunas especies de teocintle son distintas al maíz tanto genéticamente y taxonómicamente, y aparentemente no tienen ninguna relación con el maíz. Sin embargo, una forma de teocintle, conocida como *Z. mays* ssp. *parviglumis*, muestra particularmente una relación genética cerrada con el maíz y evidencias disponibles indican que es el antecesor directo del maíz. Este

teocintle crece en los valles del suroeste de México. En esta región crece como una planta salvaje y muchas veces invade campos de cultivos. Es más común encontrarlo a las orillas del río Balsas en el suroeste de México y por lo tanto es conocido como teocintle Balsas (Doebley, 2004).

## II. 2. 1 Descripción botánica del teocintle.

Los teocintles más abundantes en la naturaleza son las formas anuales diploides encontradas como poblaciones silvestres o semisilvestres. Estas plantas presentan un aspecto exterior similar al del maíz (tallos, hojas, y espiga terminal) que en ocasiones los confunde. El carácter que en realidad los diferencia es la inflorescencia femenina que en maíz es una mazorca polística (varias hileras de granos) con la semilla desnuda, en cambio el teocintle presenta mazorcas dísticas (dos hileras) con la semilla protegida por un segmento duro del raquis. Las semillas del teocintle son dispersadas como segmentos del raquis (cápsulas del fruto) debido al desarrollo de un tejido de abscisión entre esos segmentos. La espiga o inflorescencia masculina también se desarticula por el desarrollo de un tejido de abscisión. Ésta es una capacidad de dispersión de las semillas que el maíz perdió durante el proceso de domesticación y que distingue al teocintle como pariente silvestre (Doebley, 1983; Benz e Iltis, 1990).

Otros rasgos que separan al teocintle y al maíz son el pequeño número de semillas producidas en cada espiga femenina (5 a 11) y el gran número de espigas agrupadas en un fascículo. Estos racimos emergen de las ramas laterales de modo que en las plantas robustas del teocintle estas ramificaciones les dan un aspecto similar a un candelabro en comparación con el tallo erguido y único de la planta de maíz (caña). Sin embargo, en las poblaciones de teocintle se forman una proporción variable de plantas no ramificadas. En el teocintle, en cada rama lateral se desarrolla una espiga masculina en su extremo (Doebley, 1983; Benz e Iltis, 1990). La cantidad total de semilla producida por una planta de teocintle es generalmente de 5-8 semillas/mazorca (Wilkes, 2004).

## II. 2. 2 Características morfológicas del teocintle y maíz.

Existen notables diferencias entre el teocintle y el maíz cultivado, este último tiene entre las hojas pequeñas ramas laterales que portan la flor femenina, que después de la fecundación formará la mazorca. La flor masculina se encuentra en la punta del eje central de la planta. En contraste, el teocintle tiene un tallo erecto que se ramifica en forma de candelabro, en el que cada uno de los brazos, las ramas laterales, portan las flores femeninas y culminan en una flor masculina (Figura 9).



Figura 9. Teocintle anual mexicano (izquierda), con ramificaciones les dan un aspecto similar a un candelabro por la forma en que crece, lo cual difiere del maíz (derecha) (Doebley, 1992).

La diferencia más notable radica en la estructura que porta los granos. En el caso del teocintle, esta estructura no se parece en nada a una mazorca. Los granos del teocintle están pegados unos a otros por una capa llamada zona de abscisión, que permite que se desprendan con facilidad una vez que están maduros (Figura 10a-e). En cambio, en el elote del maíz los granos permanecen pegados al “olote”, hasta que desgrane con ayuda del hombre. Esta es una característica importante,



porque al no desprenderse, las semillas del “olote” ya no pueden dispersarse de forma natural y, por consiguiente, su distribución y reproducción dependen completamente de la intervención humana.

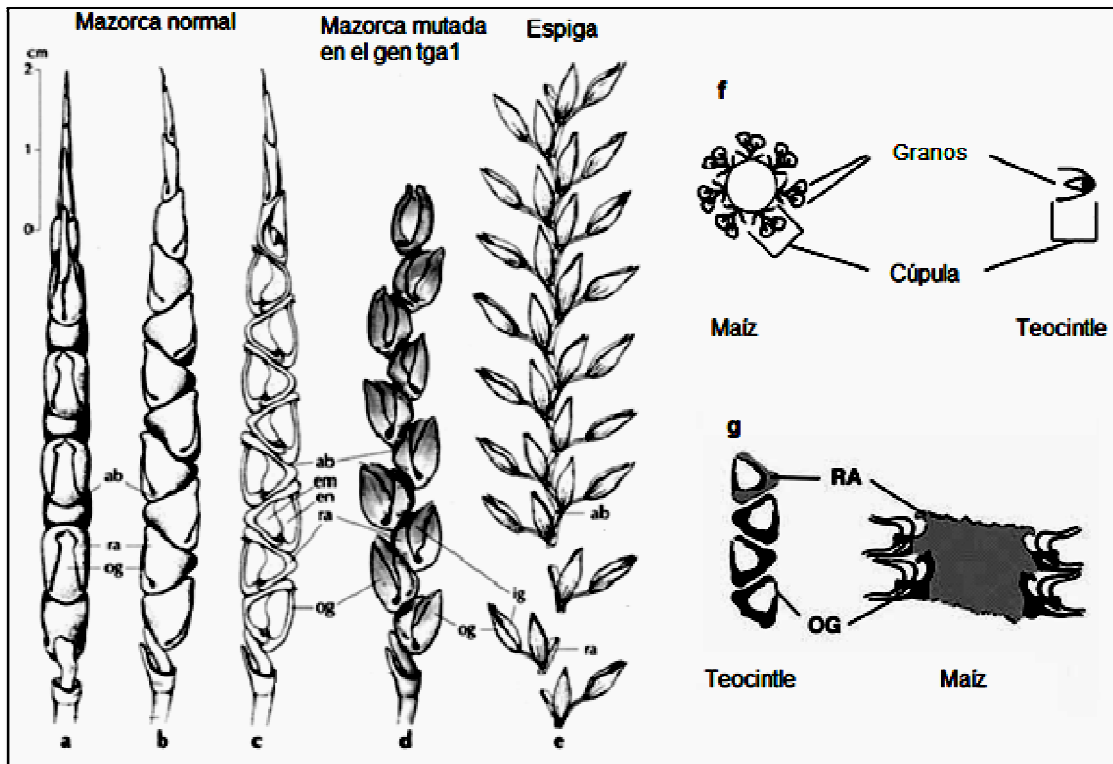


Figura 10. Mazorcas del teocintle, normal y mutado, y espiga. Inflorescencias (a-c) femeninas (mazorca) y (e) masculinas (espiga) de *Zea mays* ssp. *mexicana*, raza Chalco, teocintle anual del Valle de México: (a) vista de frente de la mazorca, (b) vista de lado de la mazorca, (c) sección longitudinal de (b) mostrando el grano cubierto con una cáscara. Las inflorescencias cuentan con: zona de abscisión (ab), segmentos de raquis (ra), gluma externa (og), germen (em), y endospermo (en), en la espiga también se encuentra gluma interna (ig). Sección horizontal de la mazorca (f): en el teocintle los granos están acomodados de uno en uno en las cúpulas, en el maíz se presentan de dos en dos de una sola cúpula de poca profundidad. La cúpula del teocintle (g) se forma a partir del entrenudo del raquis invaginado (RA), la gluma exterior (OG) sella la apertura de la cúpula, por lo que oculta el núcleo de la vista (Lauter y Doebe, 2002; Iltis, 2000; Doebley, 2003).

Otra diferencia radica en el número de granos, el elote del maíz posee cuatro o más hileras de granos; en cambio, la espiga del teocintle tiene sólo dos hileras de granos tan estrechamente intercaladas que parecen una sola. Los granos del teocintle están protegidos por una capa muy dura, que en el grano del maíz es muy suave y más pequeña (gluma) (Figura 10g).

Por último, los granos del teocintle están acomodados de uno en uno, en unas estructuras profundas llamadas cúpulas y en contraste, los granos del maíz surgen de dos en dos, de una sola cúpula de poca profundidad (Figura 10f) (Doebley, 1992).

A pesar de las profundas diferencias en la morfología de la mazorca y de la planta, el teocintle y el maíz son muy cercanos genéticamente; ellos pueden hibridarse y producir híbridos viables totalmente fértiles. La herencia de las características clave que distinguen al maíz del teocintle ha sido estudiada por Doebley y colaboradores durante dos décadas. Algunas características morfológicas están bajo el control de genes múltiples y herencia cuantitativa. Se han identificado cinco regiones del genoma que tienen efectos muy fuertes sobre las diferencias observadas entre el maíz y el teocintle (Doebley, 2004). Sin embargo, un acontecimiento clave en la domesticación de maíz, fue la liberación del grano de la cubierta protectora que lo envuelve en el teocintle y es controlado por un solo gen (Wang y col., 2005). La semilla individual del teocintle está encerrada en un segmento duro del raquis llamado cápsula del grano, y es dispersada cuando el tejido del raquis en la vaina forma una zona de abscisión y se desarticula, este es precisamente el carácter que distingue al teocintle como planta silvestre (que se puede dispersar y establecer de manera independiente a la intervención humana) del maíz que es planta domesticada.

## II. 2. 3 Características genéticas del teocintle y maíz.

Se conoce que existen muchos genes que diferencian al maíz del teocintle: *Pd:pd* espiguillas apareadas vs no apareadas; *Tr:tr*, espiga central dística vs polística; *Ab:ab*, segmentos de raquis con abscisión y sin abscisión (Galinat, 1992, 1995);

*tga1*, arquitectura de gluma en teocintle que libera al grano de la cápsula endurecida que lo contiene (Dorweiler y Doebley, 1997); *tb1*, teocintle ramificado, que controla la dominancia apical en el maíz relativo al teocintle (Clark y col., 2004) y *te1*, mazorca terminal (White y Doebley, 1999); estos genes y posiblemente otros más y sus alelos, han sido estudiados por Doebley y Stec (1991, 1993) que por su acción conjunta hacen al maíz; sin embargo, es claro que uno sólo de esos genes, aún cuando sea el correcto, no tendría la expresión fenotípica del maíz como se conoce a esta planta. Aquí son pertinentes las observaciones hechas por Randolph (1976) de que las diferencias entre teocintle y maíz son genéticamente más complejas que lo arriba señalado, principalmente porque existen muchas diferencias de carácter poligénico. De esta manera, mediante un evento simple (mutación) no es posible que se forme una planta de maíz como lo postulan Matsuoka y col. (2002), por lo tanto, el origen de éste debe haber sido gradual, de tal modo que paso a paso los diferentes alelos de los genes necesarios fueron creándose e integrándose en las poblaciones de teocintle, primero, para lograr los tipos precursores (variación genotípica) y, después, los intermedios (diferentes combinaciones de los mutantes, la materia prima del proceso de domesticación), que, una vez aislados de la influencia del teocintle, pudieron someterse al proceso de domesticación propiamente dicha. De esta forma, los tipos intermedios deben haber llegado a estar ampliamente distribuidos en las poblaciones del teocintle de tal manera que al hombre de hace 7-8 mil años fue relativamente más fácil encontrarlas para someterlas a la domesticación mediante su cultivo en lugares aislados del teocintle. En este punto puede decirse que el hombre pudo iniciar el proceso de domesticación para originar al maíz, propiamente dicho, y a su vez continuar la domesticación con el fin de consolidar la nueva planta bajo su protección y multiplicación, y así crear la agricultura. Bajo esta argumentación, la hipótesis multicéntrica de Kato (1984), McClintock (1978) y McClintock y col. (1981) se robustece, ya que proponen que en las poblaciones de teocintle constantemente se estuvieron formando mutantes tipo maíz que pudieron tener muchas posibilidades de cruzarse entre ellas y avanzar en el proceso evolutivo hacia el maíz actual (Kato y col., 2009).

## II. 2. 4 Clasificación taxonómica del género *Zea* y parientes silvestres.

El género *Zea* contiene cinco especies de México y Centroamérica: *Zea diploperennis* Iltis, Doebley y Guzmán; *Zea perennis* (Hitchcock) Reeves y Mangelsdorf; *Zea luxurians* (Durieu y Ascherson) Bird; *Zea mays* Linnaeus y la descrita recientemente *Zea nicaraguensis* Iltis y Benz. El *Zea mays* L., es la especie a la que corresponde el maíz (forma cultivada del género), la cual debido a su estrecha relación biológica ha sido agrupada con los teocintles de las subespecies *parviglumis* y *mexicana* (Cuadro 1) (Doebley e Iltis 1980; Iltis y Doebley 1980).

Cuadro 1. Nomenclatura usada en la clasificación de teocintle y maíz.

Wilkes (1967)	Iltis y Doebley (1980)	Doebley (1990)	Doebley (2003)
Sección ZEA	Sección ZEA	Sección ZEA	Sección ZEA
<i>Zea mays</i> L.	<i>Zea mays</i> L.	<i>Zea mays</i> L.	<i>Zea mays</i> L.
Sección EUCHLAENA	spp. <i>mexicana</i>	spp. <i>mexicana</i>	spp. <i>mexicana</i>
<i>Euchlaena mexicana</i>	Raza Chalco	Raza Chalco	
Sin. <i>Zea mexicana</i>	Raza Mesa Central	Raza Mesa Central	
Raza Chalco	Raza Nobogame	Raza Nobogame	Raza Nobogame
Raza Mesa Central	ssp. <i>parviglumis</i>	Raza Balsas	ssp. <i>parviglumis</i>
Raza Nobogame	var. <i>huehuetenangensis</i>	ssp. <i>huehuetenangensis</i>	ssp. <i>huehuetenangensis</i>
Raza Balsas	ssp. <i>mays</i>	ssp. <i>parviglumis</i>	ssp. <i>mays</i>
Raza Huehuetenango	Sección LUXURIANTES	Sección LUXURIANTES	Sección LUXURIANTES
Raza Guatemala	<i>Zea luxurians</i>	<i>Zea luxurians</i>	<i>Zea luxurians</i>
<i>Zea perennis</i>	<i>Zea perennis</i>	<i>Zea perennis</i>	<i>Zea perennis</i>
	<i>Zea diploperennis</i>	<i>Zea diploperennis</i>	<i>Zea diploperennis</i>
			<i>Zea nicaraguensis</i>

Nota: *Zea mexicana* (Schrader) Kuntze tiene las siguientes razas de acuerdo con Wilkes (1970); Chalco, Mesa Central, Nobogame, Balsas, Huehuetenango. Iltis y Doebley (1980) no consideraron razas sino subespecies. Recientemente, Doebley (2003) mantiene el uso de subespecies para enfatizar su cercanía con el maíz.

La clasificación del género *Zea* ha cambiado con el tiempo. En un inicio los primeros ordenamientos emplearon aspectos morfológicos resultantes de la selección humana durante el proceso de domesticación (Harshberger, 1896; Mangelsdorf y col., 1964; Wilkes, 1967). Este ordenamiento permitió la diferenciación de dos secciones: la sección *Euchlaena* que incluía todos los

teocintles en este grupo; y por la otra parte la sección *Zea*, y que sólo incluía al maíz. Posteriormente Doebley e Iltis (1980), elaboraron una clasificación para *Zea* con base en estructuras morfológicas neutrales, aunque un elemento clave fue la descripción de las glumas de las espiguillas en las dos especies, considerada como una estructura en la que el humano no interviene en su modificación. El resultado fue una nueva división que produjo dos secciones: Luxuriantes y *Zea* (Doebley e Iltis, 1980; Doebley, 2003).

En la sección Luxuriantes se incluyen cuatro especies silvestres: *Z. diploperennis*, *Z. perennis*, *Z. luxurians* y *Z. nicaraguensis*. Las características comunes de hábitos perennes (las dos primeras), inflorescencias menos ramificadas, pedicelos más cortos en las espigas masculinas y frutos de forma trapezoidales en arreglo exterior, las relacionan con el género *Tripsacum* (Kato y col., 2009).

La sección *Zea*, contiene solamente la especie *Z. mays* con cuatro subespecies (Doebley e Iltis, 1980; Iltis y Doebley, 1980), caracterizadas por poseer cromosomas con estructuras heterocromáticas en posiciones intercalares y algunas terminales, con pedicelos más largos que los de la sección Luxuriantes. Los teocintles anuales de la sección *Zea* tienen cápsulas de los frutos de forma triangular en su arreglo exterior (Kato y col., 2009).

II. 2. 4. 1 *Zea mays* agrupa cuatro subespecies.

- 1) *Zea mays* L. ssp. *huehuetenangensis* (Iltis y Doebley) Doebley; distribuida en la zona de San Antonio Huista, Buxup, Lupina y Tzibaj en altitudes de 900-1650 m en Guatemala.
- 2) *Zea mays* L. ssp. *mexicana* (Schrader) Iltis, comprende las razas Chalco del Valle de México, Mesa Central en el Bajío y Nobogame en la región sur de Chihuahua. Este último es el más precoz de las tres razas mencionadas.
- 3) *Zea mays* L. ssp. *parviglumis* Iltis y Doebley o raza Balsas según Wilkes (1967), la cual se distribuye desde la Sierra Madre del Sur, Cuenca del Balsas y Oaxaca hasta Nayarit.

4) *Zea mays* L. ssp. *mays*, el maíz cultivado propiamente, la cual se distribuye en casi todo el territorio nacional (Kato y col., 2009).

## II. 2. 5 Distribución del teocintle.

El teocintle se encuentra distribuido en México y América Central (Figura 11 y Cuadro 2) el cual es el pariente más cercano del maíz (*Zea mays* ssp. *mays* L.) (Fukunaga y col., 2005).

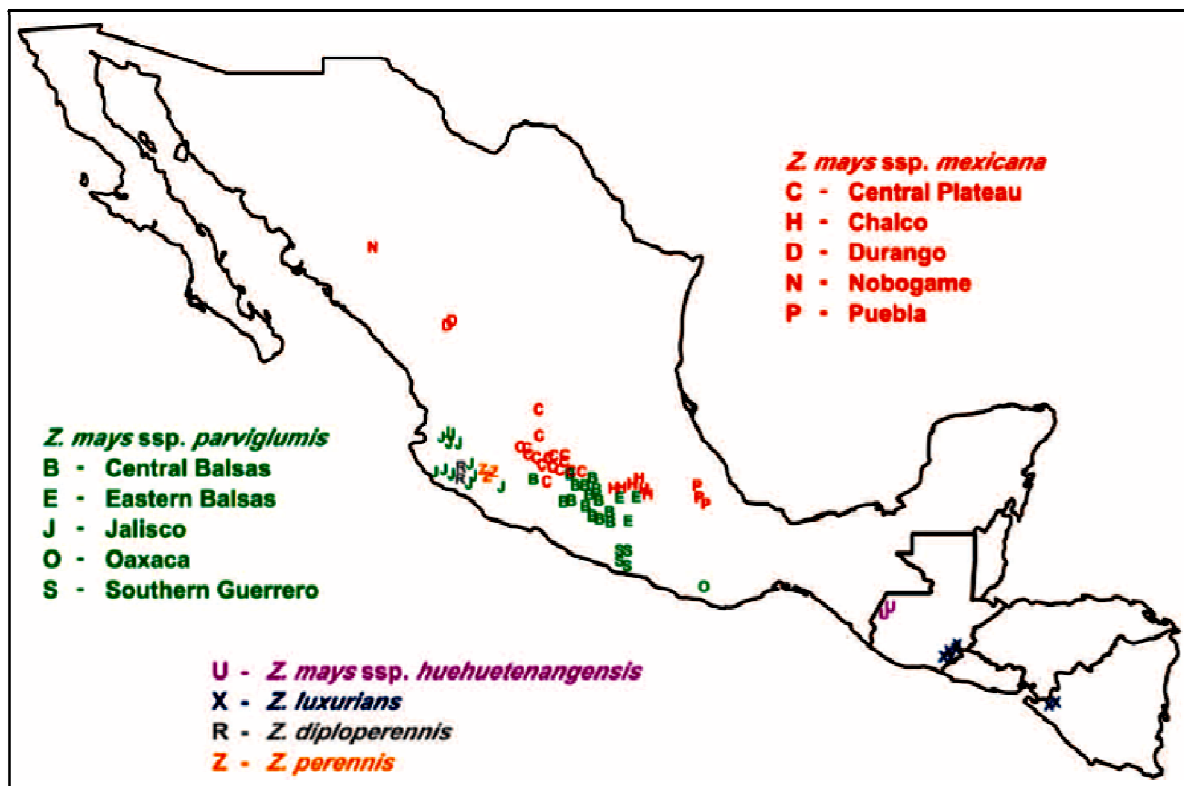


Figura 11. Distribución geográfica de las poblaciones de teocintle en México y Mesoamérica.

### II. 2. 5. 1 Distribución del teocintle en México.

En las diferentes regiones de México existen poblaciones de teocintle con características morfológicas y genéticas que permiten su diferenciación. Un aspecto que cabe resaltar en relación con la distribución geográfica de teocintle, es que las poblaciones no tienen una distribución uniforme, sino que hay condiciones

específicas de clima, suelo e influencia humana, donde es posible localizarlas (Sánchez y Ruiz, 1995). Por lo cual, en la Figura 12 se muestra la ubicación geográfica de las poblaciones a nivel nacional; con base en dicha figura, las áreas de distribución de teocintle en México se dividieron por regiones.

Cuadro 2. Clasificación del género *Zea* y su distribución (CONABIO, 2008c).

Sección	Especie	Subespecie	Raza	Distribución
Luxuriantes (perennes)	<i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman			México (Jalisco)
	<i>Zea luxurians</i> (Durieu) Bird			Guatemala y Honduras. En México posiblemente en San Agustín, Oaxaca
	<i>Zea perennis</i> (Hitchc.) Reeves y Mangelsdorf			México (Jalisco)
	<i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz			Nicaragua (Chinandega)
Zea (anuales)	<i>Zea mays</i> L.	<i>Zea mays</i> ssp. <i>mays</i>		Cultivada mundialmente, en México la mayor diversidad de razas de maíces
		<i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrader) Iltis	Nobogame	México (Chihuahua)
			Mesa central	México ( Norte de Michoacán y sur de Guanajuato)
			Durango	México (Durango)
			Chalco	México (casi exclusivamente Chalco y Texcoco, Estado de México)
		<i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley	Balsas	México (Guerrero, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Jalisco y Estado de México)
		<i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> Doebley	Huehuetenango	Guatemala (Huehuetenango)

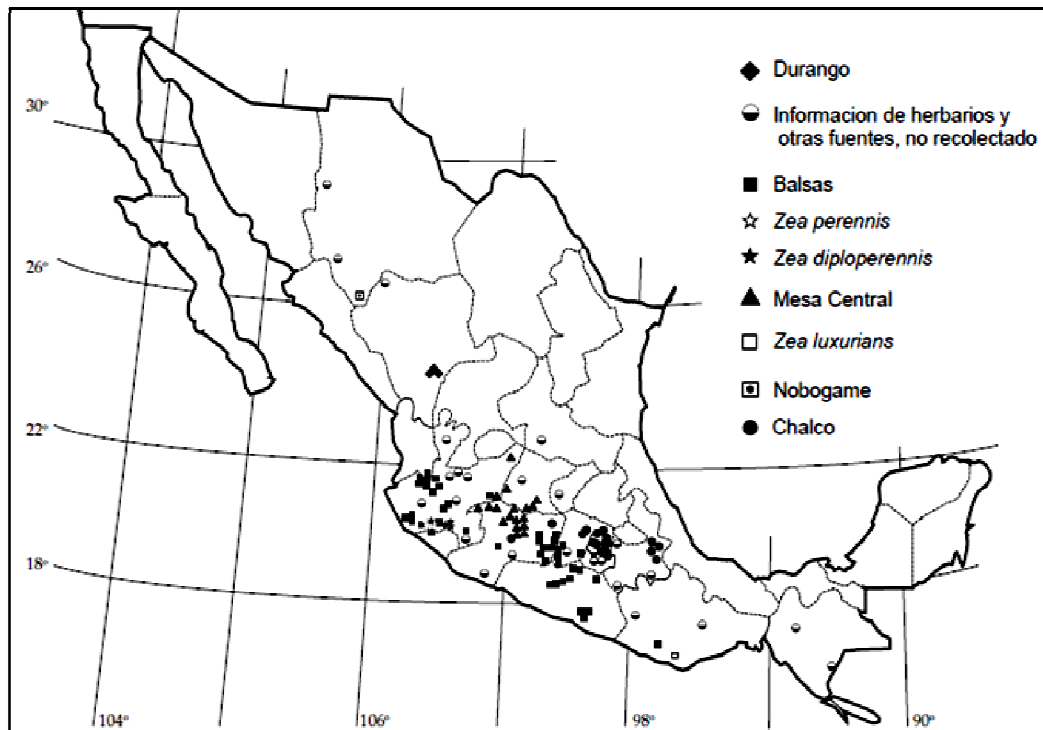


Figura 12. Distribución de teocintle en México (Sánchez y Ruiz, 1995).

#### II. 2. 5. 1. 1 Valle de Nabogame, Chihuahua.

Este es un valle pequeño de aproximadamente 50 km<sup>2</sup> situado a 26° 15' de latitud norte (LN) y 106° 58' de longitud oeste (LO), en la Sierra Madre Occidental, aproximadamente a 16 km al noroeste de Guadalupe y Calvo, en el sur del estado de Chihuahua y a una altitud media de 1850 m. El clima es templado, el teocintle se encuentra creciendo entre el maíz y en las orillas los arroyos que cruzan el valle (Sánchez y Ruiz, 1995), además esta área se encuentra rodeada de laderas boscosas cubiertas de pino (CONABIO, 2008a).

#### II. 2. 5. 1. 2 Valle de Guadiana, Durango.

Este valle forma parte de la Altiplanicie Mexicana y tiene una altitud media de 1890 m, situado a 24°LN y 104°30' LO. Esta porción tiene un clima de estepa con vegetación predominante de plantas xerófilas. El teocintle se encuentra en forma abundante a la vera de arroyos y canales de riego en un área al este y noroeste



distante entre 8 y 20 km de la ciudad de Durango (Figura 13) (Sánchez y Ruiz, 1995).



Figura 13. Teocintle Durango, el de la derecha es la espiga y el de la izquierda es la mazorca (Collins, 1921).

#### II. 2. 5. 1. 3 Occidente de México.

Las precipitaciones pluviales de las áreas donde se localiza el teocintle van de 500 a 1900 mm y las temperaturas medias anuales de 16 a 27 °C.

El teocintle se encuentra en los climas templados de la ladera norte del Nevado de Colima en donde se localiza *Zea perennis* (Figura 14) y en la Sierra de Manantlán, en donde se encuentra *Zea diploperennis*. Los teocintles anuales se encuentran en clima semicálido como en San Jerónimo, Jalisco; en climas cálidos semisecos como El Palmar, Jalisco, y Amatlán de Cañas, Nayarit; y en climas cálidos subhúmedos como Jirotto y La Huertita, Jalisco (Sánchez y Ruiz, 1995). De acuerdo con los reportes de la CONABIO (2008a), las áreas donde se encontró *Zea mays* ssp. *parviglumis* fueron: (i) El Saucito, lugar cercano a Jilotlán de los Dolores, Jalisco; (ii) La Lima y El Rodeo, Jalisco y San Antonio y El Sauz en Colima al extremo este de la Sierra de Manantlán; (iii) El Palmar, Naranjo de Enmedio, El Cuyotomate, San Lorenzo, Aguacaliente y Ejutla, Jalisco; (iv) Jirotto, Talpitita, Los Cimientos, El Tepopote y La Cofradía en Jalisco, (v) Amatlán de Cañas, Nayarit; y

el *Zea mays* ssp. *mexicana* se encontró en: (vi) Ciénega de Chapala, sobre todo en las cercanías de San Jerónimo, La Barca y Poncitlán, Jalisco, (vii) San Andrés Milpillas del municipio de Huajicori, Nayarit.



Figura 14. En esta ilustración muestra una hoja, una espiga y una mazorca (granos con forma trapezoidal) del teocintle *Zea perennis* del estado de Jalisco, Mexico. (Collins, 1921).

#### II. 2. 5. 1. 4 El Bajío.

Esta área forma parte de la Altiplanicie Mexicana y está situada entre los 19 y 21° LN y de los 100 hasta los 102° LO, con altitudes que varían de 1500 a 2000 m, con clima templado moderadamente lluvioso y una amplitud de precipitación anual de 700 a 1000 mm. Tiene invierno seco no riguroso, temperaturas medias anuales de 16 a 22 °C, y verano cálido. Esta región abarca principalmente porciones de los estados de Guanajuato y Michoacán, muestra numerosos valles separados por elevaciones de importancia, colocados a diversos niveles, que son en su mayoría antiguos lagos. El teocintle se encuentra de manera predominante en los campos cultivados de maíz, y también a lo largo de cercas de piedra que bordean algunos de dichos campos. Dentro del estado de Michoacán el teocintle se localiza en regiones de clima semicálido y subhúmedo.

#### II. 2. 5. 1. 5 Valle de México y sureste de Puebla.

Esta región se ubica en la porción sur de la Altiplanicie Mexicana y está situada entre los 19 y los 20° LN y los 97 hasta 100° LO. La región está constituida por valles rodeados por elevadas montañas que son parte del Eje Volcánico y que forman cuencas cerradas. En esta área predomina el clima templado subhúmedo y semifrío subhúmedo, con precipitaciones anuales superiores en lo general a los 700 mm, temperaturas medias anuales de 12 a 18 °C y una altitud que varía de los 2250 a los 2650 m. En toda esta región, el teocintle ocurre en forma exclusiva como maleza en los campos cultivados de maíz (Sánchez y Ruiz, 1995; CONABIO, 2008a), el teocintle Chalco (Figura 15) crece con la flora nativa y en competición con otras plantas en campos en el estado de Guerrero (Wilkes, 1972).

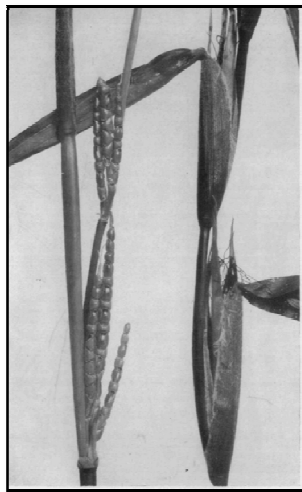


Figura 15. Tallos de teocintle Chalco recolectado en las orillas del poblado de Chalco. Las hojas han sido removidas del tallo de la izquierda, exponiendo la mazorca (Collins, 1921).

#### II. 2. 5. 1. 6 Cuenca del Balsas.

Es una región baja con altitud media de 1000 m situada entre la Sierra Madre del Sur y la Cordillera Neovolcánica, entre los 17 y 20° LN y los 98° a 103° LO. La precipitación pluvial es variable, oscilando de 500 a 1200 mm, con una media anual

de 650 mm. La temperatura es elevada con medias anuales de hasta 28 °C; el clima es cálido seco tipo sabana con invierno seco.

Dentro de esta zona quedan comprendidos el estado de Morelos y porciones importantes de los estados de Jalisco, Michoacán, México, Guerrero, Puebla y Oaxaca. En la Cuenca del Balsas es donde se encuentran las poblaciones más grandes de teocintle en México y que predominan en áreas montañosas con altitudes que varían desde los 800 hasta los 1900 m (Sánchez y Ruiz, 1995; CONABIO, 2008a).

## II. 2. 5. 2 Distribución del teocintle en Mesoamérica.

### II. 2. 5. 2. 1 Nicaragua.

El teocintle anual *Zea nicaraguensis* (Figura 16), crece en aislamiento geográfico en la planicie costera y los bajos inundados y esteros cerca del Golfo de Fonseca, en el estado de Chinandega en los municipios de Apanuca (12° 53'56'' latitud norte, 86° 58'59'', longitud oeste y 10 msnm) y Villa Nueva (Iltis y Benz, 2000).

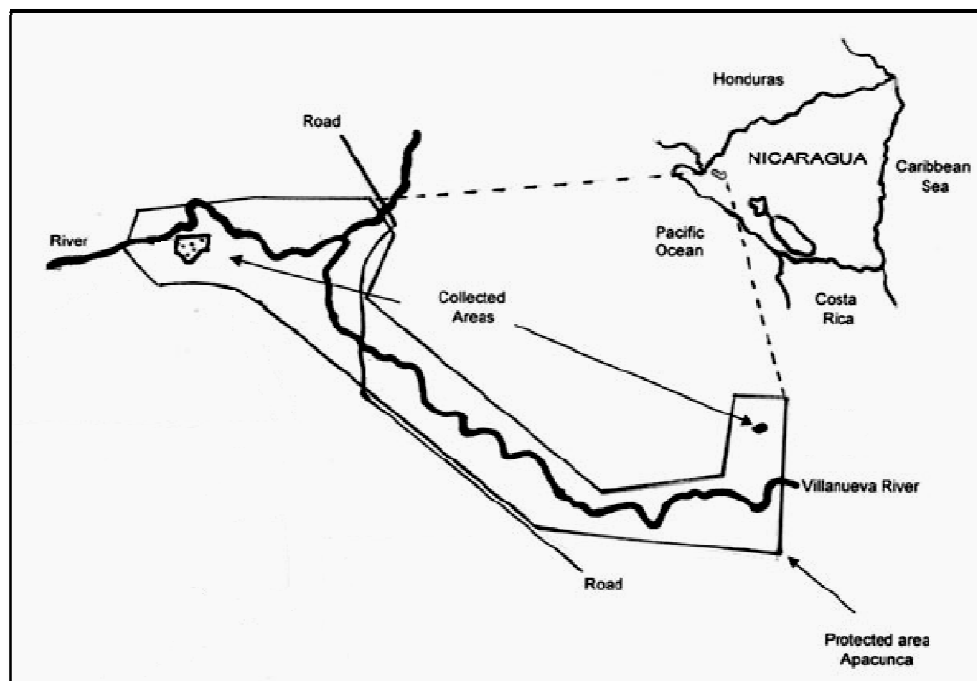


Figura 16. Distribución de poblaciones de teocintle en Nicaragua (Loáisiga y col, 2010).

## II. 2. 5. 2. 2 Guatemala.

Dos razas se describen: raza Huehuetenango (estado de Huehuetenango, en localidades como San Antonio Huista, Tzibaj; Figura 17) (Smith y col., 1981, 1982, 1984) teocintle presente en el norte de Guatemala está limitado por colinas y valles del estado de Huehuetenango frontera con México, se presenta a orillas de terrenos, carreteras o bien como maleza dentro del cultivo del maíz, es frecuente a orilla de los cerros (Wilkes, 1977), las localidades en las que se presenta varían en altitud desde 860 a 1700 msnm.



Figura 17. Mapa mostrando los sitios de colección del teocintle en Guatemala (Smith y col., 1981).

Y la raza Guatemala (*Zea luxurians*; Figura 18) (estado de Jutiapa, Jalapa, Santa Rosa, Chiquimula, El Progreso; Figura 17) (Smith y col., 1981, 1982, 1984), se encuentra en la zona seca del sureste de Guatemala, específicamente en los estados de Jutiapa, Jalapa y Chiquimula, crece en áreas abandonadas, a orillas de caminos, como maleza dentro del cultivo de maíz, arroz o sorgo, dentro de áreas con vegetación secundaria, y algunas veces formando poblaciones aisladas, está distribuido en localidades que varían de 850 a 1150 msnm (Wilkes, 1977).

## II. 2. 6 Situación de las poblaciones del teocintle.

De acuerdo a Sánchez y Ruíz (1995), en las últimas décadas han estado ocurriendo diversos acontecimientos en México que tienen relación con la diversidad y erosión genética del maíz y especies silvestres emparentadas. Entre los aspectos más importantes se encuentran la apertura de caminos y explotaciones forestales; la menor disponibilidad de agua para riego y cambios de cultivos; el crecimiento poblacional y urbanización de áreas agrícolas; el establecimiento creciente de praderas para explotaciones ganaderas, el uso de variedades mejoradas en áreas de riego o buen temporal y desplazamiento de variedades nativas. Wilkes (1995) indica que el factor que puede ocasionar la extinción del teocintle es el cambio acelerado del uso del suelo hacia el pastoreo, el teocintle no tiene ningún mecanismo de protección contra los animales que pastan.



Figura 18. Teosinte Guatemala, se asemeja en algunas características al género *Tripsacum* (Wilkes, 1977).

De acuerdo a Godínez y col. (2009), mencionan que a corto plazo, deberán iniciarse trabajos de conservación y darse prioridad a las poblaciones con los menores niveles de diversidad y en especial a aquellas raras y aisladas como San Lorenzo, Jalisco, El Sauz, Colima, Cojumatán en Michoacán y todas la poblaciones de *Zea diploperennis*.

En los reportes de la CONABIO (2008a), se menciona que las poblaciones de teocintle se encuentran modificadas con peligro de que en un futuro estas se extingan (Figura 19), debido al crecimiento urbano, apertura de nuevas vías de comunicación, pastoreo intenso; por lo que es importante protegerlas, y no solamente al *Zea perennis* y *Zea diploperennis*, como se menciona en la Norma Oficial Mexicana SEMARNAT 2001, NOM-059-ECOL-1994, eventualmente a todas las poblaciones de teocintle.

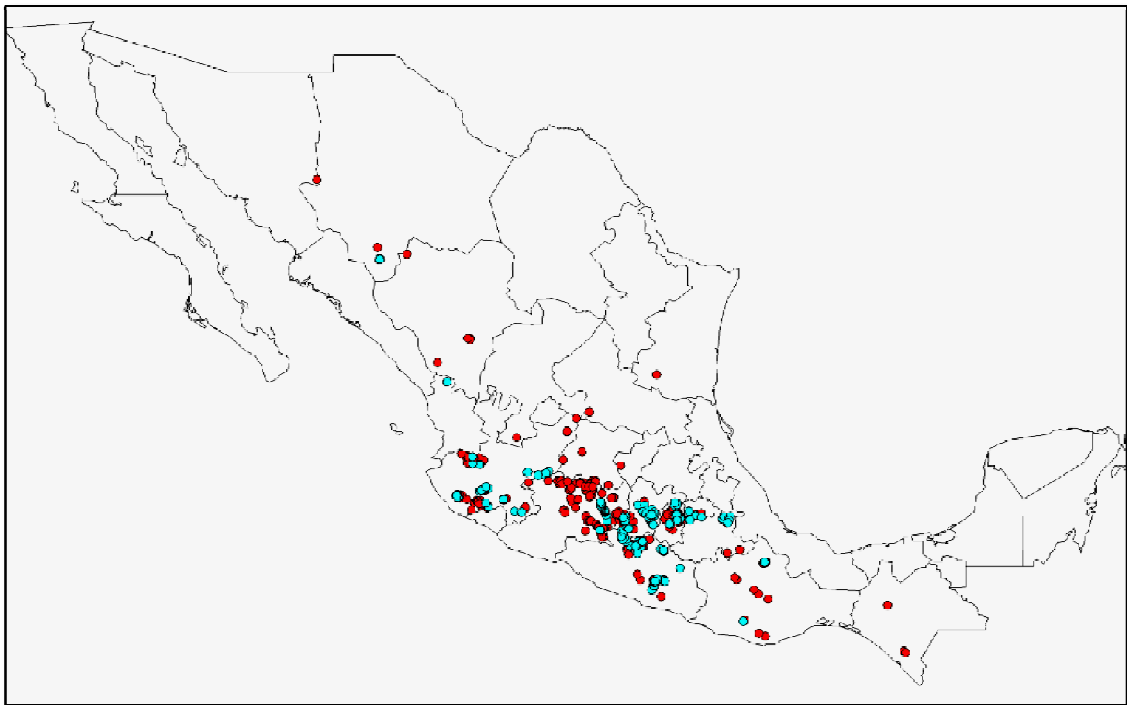


Figura 19. Registros históricos de teocintle (antes de 2007 en círculos naranja) e información 2007-2008 (círculos azules) (CONABIO, 2008a).

## II. 3 El almidón.

### II. 3. 1 Generalidades del almidón.

El almidón es la mayor reserva de carbohidratos en las plantas. Se almacena en forma granular en muchos órganos de las mismas, incluyendo semillas, raíces, tallos, hojas, flores y frutos. El almidón se diferencia de todos los demás carbohidratos en que la naturaleza se presenta como complejas partículas discretas (gránulos). Los gránulos de almidón son relativamente densos e

insolubles, y se hidratan muy mal en agua fría. La capacidad de formar soluciones viscosas (capacidad espesante) es alcanzado sólo cuando la suspensión de los gránulos es sometida a la acción del calor. Una segunda propiedad única es que el almidón normal contiene dos tipos de moléculas; amilosa y amilopectina, a una relación aprox. de 1:3, respectivamente (Perera y col., 2001). Tales moléculas representan el 99% del peso seco del gránulo de almidón (Tester y col., 2004).

El almidón es una de las sustancias más ubicuas en las plantas y es el componente que se encuentra en mayor cantidad en el grano de maíz, mismo que se localiza mayoritariamente en forma de gránulos dentro del endospermo (Finnie y Svensson, 2003).

El almidón es una de las materias primas más importantes en aplicaciones industriales. En su forma nativa granular, el almidón tiene aplicaciones limitadas. Sin embargo, usando modificaciones químicas y físicas, el almidón ha sido aplicado a una gran variedad de productos industriales incluyendo ingredientes alimentarios, plásticos basados en almidón e industrias del papel y textil.

El almidón presenta numerosas propiedades funcionales que dan lugar a diversas aplicaciones en alimentos u otras ramas industriales. El almidón es utilizado como agente espesante, de cobertura, gelificante, adhesivo y como agente encapsulante. Algunas de estas funcionalidades son únicas del polímero debido a la estructura de amilosa y amilopectina y su organización. La gelatinización, retrogradación y formación de pasta son los tres fenómenos más importantes que definen la funcionalidad del almidón en sus diferentes aplicaciones (Liu, 2005).

Los gránulos de almidón de diferentes fuentes pueden diferir en tamaño y forma. El origen de los gránulos de almidón puede ser inferido a partir de su tamaño, forma y posición del hilum (origen del crecimiento del gránulo). Los gránulos de almidón de cereales como el maíz, avena y arroz presentan formas esféricas o poligonales (Liu, 2005). El tamaño de los gránulos de almidón varía de 2 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro y éste es usualmente expresado como un rango o como promedio de la longitud de los ejes más largos. El tamaño de la mayoría de los gránulos de



almidón de cereales es más pequeño que el de almidones de tubérculos o legumbres.

En términos moleculares, el gránulo de almidón es una estructura altamente organizada. Cuando los gránulos son observados bajo la luz polarizada de un microscopio, aparece una cruz típica de birrefringencia, como dos bandas interceptándose (denominada cruz de Malta), la cual indica que existe un alto grado de orden molecular dentro del gránulo (Liu, 2005).

El agua es un componente integral de la estructura del gránulo y participa en el importante proceso de hidratación que toma lugar durante la gelatinización y en el subsecuente hinchamiento y disolución del gránulo. La estructura del gránulo de almidón también depende de la forma en que los polímeros de amilosa y amilopectina se asocian a través de enlaces intermoleculares de hidrógeno.

Los gránulos consisten de regiones amorfas y regiones cristalinas. Las macromoléculas de almidón presentan una organización radial, en la que el hilum representa la región menos ordenada (Baker y col., 2001). En el nivel más externo de organización se muestran las cubiertas cristalina (dura) y semicristalina (suave) alternadas. Las cubiertas son delgadas hacia el exterior del gránulo y el hilum se muestra en el centro. La presencia de enlaces  $\alpha$ -(1-6) en la amilopectina es responsable de la formación de zonas amorfas y cristalinas alternadas. Las estructuras de dobles hélices formadas por cadenas adyacentes de amilopectina dan lugar a la capa cristalina, mientras que los puntos de ramificación constituyen las regiones amorfas. Se ha sugerido que algunas moléculas de amilosa están localizadas en las regiones amorfas interaccionando con las cadenas ramificadas de la amilopectina.

Estas regiones amorfas del gránulo de almidón son susceptibles a reacciones químicas, por tanto, éstas pueden ser removidas por acción de ácidos o pueden reaccionar con grupos funcionales. Las regiones amorfas son los principales elementos estructurales de hinchamiento del gránulo nativo. Durante este proceso, la plastificación puede proveer una rápida y limitada absorción de agua (Liu, 2005).

### II. 3. 2 Estructura química.

Los gránulos de almidón se componen de dos tipos de  $\alpha$ -glucanos, amilosa y amilopectina, que representan aproximadamente 98-99% del peso seco del almidón. La relación de los dos polisacáridos varía de acuerdo con el origen botánico del almidón. Aunque el almidón consiste principalmente de estos homopolímeros de unidades de D-glucosa, es uno de los materiales más complejos de la naturaleza. El almidón puede contener otros constituyentes en bajos niveles tales como lípidos, proteínas, bajos niveles de minerales como fósforo y nitrógeno y polisacáridos diferentes de almidón, dependiendo de la fuente botánica de la cual son extraídos. En los cereales la mayoría del fósforo se encuentra en forma de fosfolípidos; en el almidón de papa (tubérculo), el fósforo se encuentra esterificado en los residuos de glucosa (Liu, 2005).

#### II. 3. 2. 1 Amilosa.

La amilosa es un  $\alpha$ -glucano de cadena relativamente larga y lineal que contiene aproximadamente 99% de enlaces  $\alpha$ -(1-4), aunque se ha reportado un bajo grado de ramificación y de cadenas de poca longitud unidas a la cadena central por enlaces  $\alpha$ -(1-6). El tamaño de su estructura depende del origen botánico y de los métodos de extracción (Tester y col., 2004). La amilosa tiene un peso molecular de aproximadamente  $10^5$ - $10^6$  g/mol (Mua y Jackson, 1997; Buléon y col., 1998; Biliaderis, 1998).

La abundancia de grupos hidroxilo a lo largo de las moléculas de amilosa imparte propiedades hidrofílicas al polímero, dándole mayor afinidad por el agua. Debido a su naturaleza lineal, su movilidad y la presencia de numerosos grupos hidroxilo a lo largo de las cadenas del polímero, las moléculas de amilosa tienden a orientarse de forma paralela y acercarse lo suficiente como para permitir la formación de enlaces de hidrógeno entre cadenas adyacentes. Como resultado, la afinidad de los polímeros por el agua se reduce y la solución que forman se vuelve opaca (Liu, 2005).

### II. 3. 2. 2 Amilopectina.

El polímero de amilopectina es más grande que el de amilosa y es altamente ramificado. Su estructura consiste en residuos de D-glucopiranosos unidos por enlaces  $\alpha$ -(1-4) (aproximadamente 95%) y 5% de enlaces  $\alpha$ -(1-6). La amilopectina es una de las moléculas biológicas de mayor tamaño y su peso molecular se encuentra en el rango de  $10^6$  a  $10^9$  g/mol, dependiendo del origen botánico del almidón (Tester y col., 2004). El gran tamaño y la naturaleza ramificada de la amilopectina reduce su movilidad en solución y elimina la posibilidad de niveles significativos de enlaces de hidrogeno entre cadenas adyacentes. En promedio, la amilopectina tiene un punto de ramificación no aleatorizado cada 20 o 25 residuos de glucosa (Thompson, 2000).

La amilosa posee cadenas largas, rectas, conocidas por formar películas fuertes y flexibles. La amilopectina, debido a su estructura ramificada, no forma películas fuertes, sino que se caracteriza por su claridad y estabilidad cuando forma geles y puede mostrar una tendencia levemente mayor hacia la absorción o ligación de sabores. La Figura 20 muestra la estructura de los polímeros que componen el almidón.

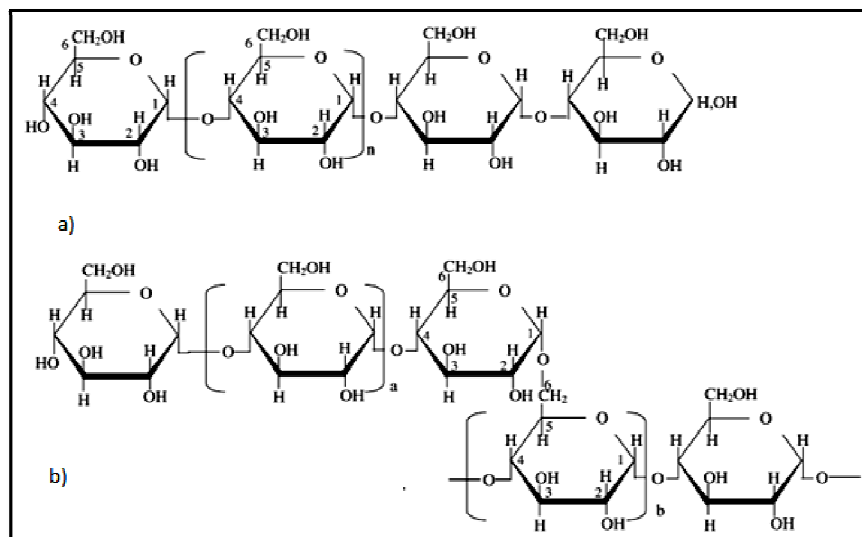


Figura 20. Estructura de a) Amilosa y b) Amilopectina (Adaptado de Tester y col., 2004).

### II. 3. 3 Caracterización estructural y fisicoquímica del almidón.

La gelatinización es la pérdida del orden molecular dentro del gránulo de almidón que conduce a cambios irreversibles tales como hinchamiento granular, fusión de cristales, pérdida de birrefringencia, desarrollo de viscosidad y solubilización. Cuando los gránulos de almidón son calentados en presencia de agua, ocurre una transición de fase. El punto de gelatinización inicial y el rango en el cual ésta ocurre dependen de la concentración, método de observación, tipo de gránulo y la heterogeneidad dentro de la población granular bajo observación (Atwell y col., 1988).

La gelatinización es de gran importancia en el procesamiento de alimentos debido a que tiene una gran influencia en la calidad del producto. Una gran variedad de técnicas analíticas han sido empleadas para investigar el fenómeno y entender el mecanismo a través del cual sucede.

La observación a través de microscopía óptica y electrónica de barrido de los gránulos de almidón durante el fenómeno de gelatinización permite conocer el grado y duración del hinchamiento, así como la integridad y tamaño de los gránulos hinchados. La técnica de calorimetría diferencial de barrido es capaz de detectar los cambios en el flujo de calor asociados con transiciones de primer y segundo orden de los polímeros de almidón, siendo posible determinar de esta manera la entalpía de transición de fase y la temperatura de fusión de los cristales de almidón. La técnica de difracción de Rayos X ha sido utilizada para estudiar el cambio en la cristalinidad y para caracterizar la transición de la estructura cristalina durante la gelatinización del almidón (Liu, 2005).

#### II. 3. 3. 1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Ésta es una técnica que se emplea ampliamente para estudiar las transiciones térmicas que sufren los materiales al ser sometidos a calentamiento. Muchos autores han estudiado transiciones térmicas de primer y segundo orden en muchos materiales usando esta técnica (Reid y col., 1993).

Las transiciones de primer orden son aquellas que se dan a una temperatura específica donde se da el cambio de arreglo estructural (fusión, ebullición, cristalización, gelatinización), donde se ve involucrado una entrega o absorción de calor y esto se ve reflejado como un máximo cuando se grafica el flujo de calor contra la temperatura del material a lo largo del proceso.

Las transiciones de segundo orden no presentan más que cambios en la capacidad calorífica del material, el cambio no ocurre repentinamente, sino en un rango de temperaturas que a menudo se calcula en el punto medio de este rango, tal como es el caso de la temperatura de transición vítrea donde el material aumenta su capacidad calorífica una vez que alcanza tal estado. No existe calor latente involucrado en la transición de segundo orden.

El fundamento de esta técnica es relativamente simple. El estudio se realiza en dos platillos; en uno de ellos se coloca la muestra a estudiar y el otro platillo queda vacío como referencia. Ambos platillos se colocan sobre la parte superior de un calefactor. Se programa la velocidad de calentamiento del equipo, la cual puede ser desde los 3-10 °C/min y debe ser constante a todo lo largo del experimento. Al transcurrir el experimento, el platillo que contiene la muestra va a ir sufriendo cambios de manera que demande o libere calor, como se requiere que la temperatura del platillo de la muestra aumente a la misma velocidad que la del platillo de referencia, significa que se debe agregar o retirar calor para lograrlo. En caso de que un almidón gelatinice, el arreglo de la estructura absorbe cierta cantidad de energía en forma de calor y lo que hace el DSC es medir cuánto calor debe suministrarse para mantener la temperatura de los platillos a la misma temperatura.

### II. 3. 3. 2 Microestructura y microscopía electrónica.

En la actualidad se han desarrollado técnicas y equipos aún más eficientes para lograr tales observaciones, y la curiosidad del hombre por explorar más a fondo las microestructuras de los materiales está en creciente aumento. A mediados del siglo pasado se desarrollaron nuevas técnicas de observación de estructuras a través de

la amplificación de la imagen, las cuales se han denominado genéricamente microscopia electrónica.

El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto. Dado que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz, pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4.000 Å, mientras que la longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 Å (Microscopia Electrónica de Barrido, 2008).

Todos los microscopios electrónicos cuentan con ciertos elementos básicos. Disponen de un cañón de electrones que emite los electrones que chocan contra la muestra, creando una imagen aumentada. Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones. El sistema de vacío es una parte relevante del microscopio electrónico, ya que los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características. Finalmente, todos los microscopios electrónicos cuentan con un sistema que registra o muestra la imagen que producen los electrones.

En la microscopia electrónica de barrido (SEM) existe una variante denominada Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) o Microscopia Electrónica de Barrido Ambiental o de Bajo Vacío, en donde la muestra es leída a una presión de vapor de agua de 1.3 mBar. La diferencia es que, en esta última, la muestra puede ser observada con una mínima preparación y bajas humedades. En cambio, en SEM se necesita una fijación con glutaraldehído o tetróxido de osmio, ser secado y llevado al punto crítico para ser luego liofilizado y recubrir la muestra con una fina capa de oro (Betchel, 1983).

La técnica de Microscopia Electrónica de Barrido Ambiental o de Bajo Vacío, ha servido para describir la morfología de los gránulos de almidón, medir su tamaño promedio, describir tipos de arreglos estructurales en el endospermo y efectos de

tratamientos sobre el gránulo de almidón (Rusnak y col., 1980; Allen y Arnott, 1981; 1982; Varriano y Zeleznak, 1982; Fannon y col., 1992; McPherson y Jane, 2000; Perera y col., 2001).

#### II. 3. 4 Buscando aplicación a los almidones.

La versatilidad de almidón, almidón modificado en particular, hace que sea muy adecuado para una amplia variedad de alimentos. El almidón contribuye a la textura, viscosidad, formación de gel, es adhesivo, ligante, retiene humedad, forma películas, y da homogeneidad al producto. Algunos almidones y féculas modificados también se están utilizando cada vez más como sustitutos de las grasas en productos bajos ó sin grasa.

Los almidones comerciales se obtienen a partir de cereales como el maíz, trigo, arroz y diversos y de tubérculos o raíces como la papa y la yuca (tapioca). Almidones de diferentes fuentes varían en el sabor y las propiedades reológicas. Por ejemplo, almidones de papa nativa y de tapioca tienen vinculación intermolecular débil y gelatinizan fácilmente para producir pastas de alta viscosidad. El almidón de papa produce pasta clara, viscosa, casi blanda, que se utilizan en productos tales como cereales extruidos y sopa seca, y mezclas para pasteles. Almidón de tapioca produce pastas claras y cohesivas que lentamente gelatinizan con el tiempo. Almidones nativos de maíz, arroz y trigo forman pastas opacas, gelificadas que tienen un sabor ligero a cereales. Almidón de maíz rico en amilosa produce geles opacos y fuertes de uso común en los caramelos de goma. Almidón de maíz ceroso produce una pasta clara y cohesiva (Thomas y Atwell, 1998; Fennema, 2000).

Debido a que las pastas y geles producidos por almidones nativos suelen ser cohesivos o gomosos, las propiedades funcionales de estos almidones son mejoradas por la modificación. Diferentes tipos de modificación producen almidones que son más capaces de soportar el calor, fuerza y ácidos asociados con las condiciones de procesado de alimentos y para introducir funciones específicas. La modificación puede tener un efecto sobre la solubilidad del almidón,

la viscosidad, la estabilidad de congelación-descongelación, claridad de pasta y el brillo, la formación de gel, formación de la película, y la cohesión.

La utilización del almidón en las industrias de alimentos y no alimentarias depende de sus propiedades físicas, químicas y funcionales. Estas propiedades son únicas para los distintos cultivos y variedades. Por lo tanto, la comprensión de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones de diferentes fuentes puede ayudar en la utilización de almidón de las diferentes aplicaciones.

Al almidón debería de considerarse como: un conjunto de características funcionales adecuadas a una determinada aplicación. Estas características derivan de las propiedades físico-químicas de los gránulos del almidón. El tamaño y la distribución de los gránulos del almidón son importantes para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, los gránulos pequeños del almidón de arroz lo hacen muy adecuado para el acabado de las telas finas y para los cosméticos para la piel. Un almidón como el del trigo no podría utilizarse -por lo menos no sin modificarlo-, debido a la distribución bimodal de sus gránulos, cuya dimensión media varía de 6.5 a 19.5 micras.

Otras características físicas simples, importantes en la funcionalidad, son la forma y superficie de los gránulos, factores críticos cuando se utiliza el almidón como portador de colores en la superficie, de sabores y condimentos. Estas cualidades son funciones de la proporción entre amilosa y amilopectina de los almidones. Ambos polímeros tienen estructuras muy distintas -lineal la de la amilosa y muy ramificada la de la amilopectina-, y cada una de ellas tiene una importancia fundamental en la funcionalidad última del almidón original y sus derivados: la viscosidad, la resistencia al corte, la gelatinización, las texturas y la solubilidad, la pegajosidad, la estabilidad del gel, la hinchabilidad por frío y la retrogradación dependen de la relación amilosa/amilopectina (FAO, 1998).

Existen numerosos factores a considerar en la elección de un almidón para uso en un sistema de alimentos en particular. Las propiedades deseadas de los alimentos (por ejemplo, la textura, sensación en la boca, y viscosidad), el método de



transformación, y los parámetros de la distribución, sobre todo las temperaturas de almacenamiento, todos deben ser examinados. Una estrategia inicial en la que los distintos requisitos de los productos alimenticios son revisados antes de la selección de un almidón ahorra tiempo, frustración y dinero probablemente en el proceso de desarrollo de productos.

#### II. 3. 4. 1 Consideraciones generales.

##### II. 3. 4. 1. 1 Consideraciones sensoriales.

El objetivo del proceso de desarrollo de productos es la creación de alimentos seguros y de alta calidad con óptimas propiedades sensoriales. Consideraciones sensoriales como la textura, la apariencia y el sabor por lo general determinan la aceptabilidad de los consumidores. El deseado "look" de un producto, que suele ser conceptualizado antes del proceso de desarrollo, no siempre es fácil de lograr. Ingredientes, elaboración y distribución influyen en la calidad del producto final y en última instancia determinan el éxito o el fracaso en el mercado.

Puesto que el almidón es un ingrediente que puede afectar la textura, el cuerpo y apariencia de un producto, muchos factores deben tenerse en cuenta. En el Cuadro 3 contiene los términos utilizados en la lengua vernácula de la industria del almidón que se asocian con la textura, el cuerpo y apariencia de alimentos que contienen almidón. Estos términos, aunque no son "científicos", se han utilizado durante años para describir el rendimiento de almidón, ya sea en forma de pasta o como parte de un producto alimenticio, durante o después del procesamiento.

Textura. El almidón puede producir diferentes texturas, que van desde granular a liso y de cohesivo (es decir, gomoso o viscoso) a gel. La granulosidad se ve afectado por el tamaño de partícula del gránulo de almidón en sí, así como por las características de cocción. El tamaño de partícula de almidones pregelatinizados por medio del secador por tambor, por ejemplo, puede ser controlado por la molienda de forma que varios tamaños de partículas se generan. El tamaño de las partículas no sólo afecta a la textura, también dispersión y la disolución del almidón. Los polvos de almidón pregelatinizado que tienen una granulación fina (es decir,

tamaño de las partículas pequeñas y por lo tanto una mayor superficie) tienen una tendencia a formar grumos durante la hidratación, sobre todo si la mezcla no es apropiada durante la etapa de adición. Almidón pregelatinizado molido grueso y/o aglomerados generalmente se disuelven más fácilmente debido a su mayor tamaño de partícula (menos superficie) y más lenta tasa de hidratación. Las partículas grandes a veces puede generar grumos, dependiendo de cómo el almidón ha sido modificado, la manera en la cual el almidón fue pregelatinizado, y/o de sus propiedades de hidratación. La cantidad de cocción que sufre el almidón también puede afectar la textura. Por ejemplo, cocinar almidones que no son lo suficientemente gelatinizados puede dar lugar a productos con sensación en la boca "pastosa" o "granuloso". Por último, una textura pastosa también puede ocurrir si es demasiado almidón el que se utiliza.

Cuadro 3. Términos comunes usados para describir productos alimenticios basados en almidón (Thomas y Atwell, 1998).

<b>Textura</b>	<b>Cuerpo</b>	<b>Apariencia</b>
Grumosa	Pesado	Mate
Lisa	Delgado	Brillante
Cohesiva (gomoso)	Largo	Opaco
Gel (suave o firme)	Corto	Traslucido

**Cuerpo.** Relacionado a la textura es la propiedad de flujo de una pasta de almidón o producto final una vez que una fuerza se ha aplicado. En pocas palabras, cómo se comporta el producto después de su transformación, sobre todo después de haber sido alterado. Algunos almidones dan como resultado una pasta y/o el producto final con cuerpo corto, pesado (por ejemplo, un pudding o un producto similar a un ungüento), mientras que otros se consideran largos y delgados, es decir, menos viscoso y más como jarabe. Tanto el tipo de base de almidón y el tipo de modificación influyen en la textura final y el cuerpo del producto.

**Apariencia.** El almidón puede afectar significativamente la apariencia o la claridad del producto. Ciertos alimentos se espera que sea mate, mientras que otros pueden requerir un brillo de superficie. Almidones gelificantes, como el del maíz dentado

nativo, es opaco después de la cocción, y otros, como el de maíz ceroso nativo, son más transparentes. La fécula de papa produce una pasta clara. La modificación química del almidón también puede afectar a la claridad pasta. Por ejemplo, sustitución de productos químicos tales como hidroxipropilación tiene una tendencia a mejorar la claridad de pasta.

Sabor. Otra consideración sensorial para el desarrollador de productos es el sabor del producto final. También en este caso, los productos de almidón y fécula relacionados pueden tener un impacto dramático. La base de almidón, el proceso de molienda, y el tipo de modificación química del almidón pueden afectar el sabor resultante. Los alimentos de sabor delicado, pueden desarrollar un mal sabor de sus ingredientes, incluido el almidón. Proteína residual y/o lípidos no se extraen durante el proceso de molienda puede influir en el sabor del almidón. Almidones a base de cereales como el maíz y almidón de trigo a veces se considera con sabores que se describen como "cartón" o "parecido al cereal." Raíces y almidones de tubérculos como la yuca y la papa, en cambio, suelen ser juzgados como más limpios en sabor. El tipo de modificación de almidón también puede influir en el sabor. En general, cuando se considera un almidón para una aplicación específica, hay que tener en cuenta el perfil de sabor que se desee y comprender el impacto que tendrá el almidón elegido en ese sabor.

#### II. 3. 4. 1. 2 Consideración del pH.

Otra característica de los productos alimenticios que hay que tener en cuenta es el pH. El pH de un producto no sólo influye en la funcionalidad de los ingredientes, pero es un parámetro importante en los procesos de dictar la conservación de alimentos. Por ejemplo, el pH es un factor crítico para determinar el tipo de proceso térmico que se requiere para "esterilidad comercial" (en relación con el crecimiento microbiano y la seguridad alimentaria). Los requisitos del proceso térmico de alimentos con alto contenido de ácido (pH <3.7), alimentos ácidos (pH 3,7 hasta 4,5), y alimentos de baja acidez (pH > 4.5) difieren entre sí y deben cumplir con normas estrictas. Condiciones ácidas pueden tener un impacto dramático en la

viscosidad de la pasta, la textura y la estabilidad. Los almidones nativos (sin modificar) son típicamente inestables en condiciones ácidas. Son susceptibles a la descomposición de viscosidad durante el proceso y también puede resultar en el desarrollo de una textura pobre. La estabilidad en un ambiente ácido es una de las principales razones que los almidones sean modificados químicamente. En general, cuanto mayor sea el grado de entrecruzamiento, el almidón es más ácido-tolerante. Aunque el pH neutro es menos perjudicial a la viscosidad del almidón, el proceso térmico que se requiere generalmente para conservar los alimentos de baja acidez es muy severo. Por esta razón, almidones y féculas modificados son también necesarios para los productos de baja acidez que requieren un proceso térmico más estricto.

#### II. 3. 4. 1. 3 Consideraciones relacionadas con la fórmula.

El tecnólogo de alimentos también tiene que estar al tanto de otros ingredientes que podrían influir en el rendimiento de almidón. La composición del producto debe tenerse en cuenta al determinar el almidón adecuado para un sistema. Por ejemplo, la cantidad de humedad presente para hidratar el almidón, la presencia de grasas y aceites, y el nivel de sólidos, tales como sales y azúcares pueden influir en el comportamiento del almidón. En general, los ingredientes que tienen una tendencia "compleja" con el almidón y/o compiten directamente con el almidón por el agua y dan un impacto negativo al rendimiento del almidón, en particular durante la gelatinización.

#### II. 3. 4. 1. 4 Consideraciones de procesamiento.

Aunque la selección de un almidón que es compatible con un proceso en particular es uno de los aspectos más críticos para lograr el rendimiento adecuado del almidón (por ejemplo, la viscosidad, la formación de gel, y de retención de agua) y la calidad del producto deseado (por ejemplo, la textura y la sensación en la boca), es tal vez el menos comprendido. Los almidones son modificados químicamente no sólo para la funcionalidad del producto, sino también para la tolerancia proceso.

Los almidones se han diseñado para llevar a cabo en, o por lo menos capaces de soportar, por lo general el medio ambiente hostil asociado a diversos procesos de elaboración de alimentos. Una preocupación fundamental es el impacto físico directo del proceso. Por ejemplo, los procesos que emplean alta fuerza de cizalla, alta temperatura, y/o alta presión se consideran perjudiciales para el rendimiento de almidón. Así, el tipo de equipo de procesamiento que se necesita debe ser tomado en consideración. Bombas de alta fuerza de cizalla, mezcladores, homogeneizadores, molinos coloidales, y cocinado pueden destruir la integridad de almidón y reducir significativamente la viscosidad de la pasta. Por lo tanto, con el fin de lograr la funcionalidad adecuada, es fundamental seleccionar un almidón modificado que pueda soportar estos procesos. En general, cuanto mayor sea el grado de modificación, particularmente los de entrecruzamiento, es más resistente el almidón y tiene una mejor posibilidad de tolerancia a condiciones extremas de proceso.

#### II. 3. 4. 1. 5 Distribución y consideraciones finales de uso.

El almacenamiento y la distribución de los productos alimenticios después de la transformación también deben tenerse en cuenta al seleccionar un almidón. Probablemente el factor más crítico es la temperatura durante la distribución. De particular preocupación son los productos que se almacenan ya sea refrigerados o congelados, especialmente si las temperaturas fluctúan durante el almacenamiento.

Para las curvas de congelación, migración de humedad, crecimiento de cristales de hielo, el efecto de los solutos, y los tipos de equipos de almacenamiento en frío, se puede decir que el requisito principal para el almidón en un producto refrigerado o congelado es que sea modificado químicamente.

El uso final, es decir, cómo el producto será preparado por el consumidor, también deben ser considerados. Por ejemplo, la elección de un almidón dependerá de si el producto será para calentarse en microondas o en horno convencional, se reconstituye con agua caliente, será refrigerado o congelado después de la preparación final.

#### II. 3. 4. 2 Guía de selección de almidón.

Con el fin de hacer la selección de almidón más fácil para el tecnólogo de alimentos, los fabricantes de almidón tienen varios tipos de folletos, panfletos y cartas de selección o mesas disponibles. Las recomendaciones específicas de almidón dentro de estas pautas son por lo general las funciones de la demanda de alimentos (por ejemplo, la textura del producto y los requisitos de pH), condiciones de procesamiento (por ejemplo, el tipo de tratamiento térmico y la cantidad de corte), y los requisitos de distribución (por ejemplo, la temperatura de almacenamiento).

Dadas las características multifuncionales de almidón, en particular ciertos tipos de almidón modificado químicamente, un producto de almidón puede funcionar adecuadamente en una variedad de alimentos. Por otra parte, ciertos almidones están diseñados específicamente para una aplicación particular. El hecho de que el almidón es "recomendado" para una aplicación determinada, sin embargo, no significa necesariamente que siempre funciona apropiadamente. Variabilidad inesperada, por lo general relacionados con la formulación del producto, procesamiento y/o las condiciones de almacenamiento, a veces puede afectar el comportamiento de almidón. Por lo tanto, la selección de la información debe ser considerada la mejor estimación del almidón a elegir y el nivel de uso, y no debe considerarse absoluta (Thomas y Atwell, 1998).

Además cabe mencionar que el almidón se utiliza en una amplia variedad de productos no alimentarios. Por ejemplo; adhesivos: gomas de cola de fusión, estampillas, encuadernación, sobres, etiquetas; explosivos: adhesivo para la cabeza de los fósforos; papel: recubrimientos de papel, relleno para pañales desechables; construcción: aglutinante para tabiques de concreto, adhesivo para madera laminada; metal: adhesivo de metal poroso, aglutinantes para núcleos de fundición; textiles: acabado de telas, estampado; cosméticos: maquillajes, cremas faciales; farmacéuticos: revestimiento de cápsulas, agentes dispersantes; minería: separación de minerales por flotación y sedimentación; otros, películas de plásticos biodegradables, baterías secas (FAO, 1998).

Por lo que el estudio que se realizó con las semillas de teocintle es importante ya que se busca darle una utilidad de tal forma que la semilla prevalezca y no se extinga, debido a que los investigadores se enfocan solo a las cuestiones genéticas, sin restarle importancia de la que tiene. En la investigación se resaltan las características de dureza del grano, microestructura y térmicas del almidón, por lo que buscando en la literatura estas propiedades no se encuentran. Con este estudio se busca que el teocintle tenga o propicie un estudio más completo y general.

### **III. HIPÓTESIS**

En base a estudios físicos, reológicos, morfológicos y térmicos; el teocintle es un producto con potencial para ser una fuente de almidón.



## **IV. OBJETIVOS**

### IV.1 General.

Evaluar propiedades físico-químicas, viscoelásticas, morfológicas y térmicas del grano y almidón de teocintle y así investigar usos potenciales de este material

### IV.2 Específicos.

1. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los granos del teocintle para asociarlo con las propiedades viscoelásticas.
2. Determinar la asociación de acuerdo a las propiedades de microestructura del grano y del almidón, con los parámetros térmicos.
3. Determinar el tipo de patrón de la estructura cristalina de los gránulos de almidón del teocintle.

## V. METODOLOGÍA

### V.1 Materiales.

#### Material biológico.

Se utilizaron 22 muestras de teocintle almacenadas en una cámara de refrigeración, originarias de México, Guatemala y Nicaragua; además muestras de maíz de razas antiguas (maíz Chapalote y palomero); proporcionadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, México) (Cuadro 4).

### V.2 Métodos.

#### V.2.1 Caracterización del grano.

##### V.2.1.1 Tamaño del grano.

Las dimensiones (largo, alto y ancho) de los granos se realizaron con un vernier digital (modelo CD-6 CD, Mitutoyo, Japón). Para la prueba se evaluaron 10 granos de cada muestra (Figura 21 y 22).

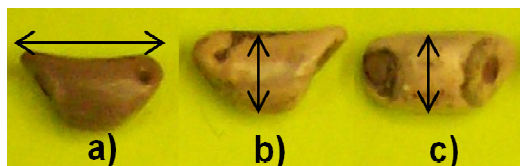


Figura 21. Dimensiones del grano de teocintle con cáscara: a) largo, b) alto y c) ancho.

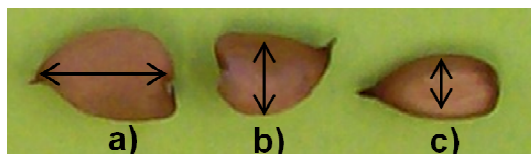


Figura 22. Dimensiones del grano de teocintle sin cáscara: a) largo, b) alto y c) ancho.

##### V.2.1.2 Dureza del grano.

Se utilizó un analizador de textura TA-XT2 (Texture Technologies Corporation, Stable Micro Systems, Surrey, England) para determinar la fuerza de compresión

de los granos, colocados entre dos placas paralelas (con una sonda cilíndrica de acero inoxidable de 10 mm de diámetro), utilizando primeramente los granos con cáscara y después sin cáscara (Ponce y col., 2008).

Cuadro 4. Diferentes razas de teocintle, utilizadas en el estudio.

Núm.	Núm. Id.	Núm. Acc.	Accesión	Raza	País	Estado/provincia	Elev.
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>							
1	9475	9475	Piedra Ancha	Z. PERE	México	Jalisco	1600
2	8837	8837	ZEA PEREN	ZEA PERENN	México	Morelos	940
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>							
3	10003	10003	San Miguel	Z. DIPL	México	Jalisco	1900
4	9476	9476	Las Joyas	Z. DIPL	México	Jalisco	1950
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>							
5	13451	11083	Iltis 30919	ZEA LUXURI	Nicaragua	Chinandega	3
6	9478	9478	TEO GUATE	GUATEM	Guatemala	Chiquimula	800
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>							
7	NSSL	420532	RB-N00:07	ZEA NICARAGUENSIS	Nicaragua	Chinandega	
<b><i>Zea mays ssp. huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>							
8	9479	9479	TEO HUEUE	HUEHUET	Guatemala	Huehuetenango	1300
<b><i>Zea mays ssp. parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>							
9	8785	8785	B73-51	BALSAS	México		1300
10	9477	9477	TEO BALSAS	BALSAS	México		850
11	8762	8762	K67_17	BALSAS	México	México	1390
12	13567	11388	WST85_3	BALSAS	México	México	1120
13	8784	8784	B72_1	BALSAS	México	Guerrero	1300
14	8767	8767	K67_24	BALSAS	México	Michoacán	880
<b><i>Zea mays ssp. mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>							
15	13552	11373	K69_11	M CENTR	México	Guanajuato	2150
16	13573	11394	WST92_3	C PLATE	México	Michoacán	1700
17	13571	11392	WST92_1	DURANGO	México	Durango	1950
18	13566	11387	WST85_2	NOBOGA	México	Chihuahua	1850
19	8753	8753	K67-3	CHALCO	México		
20	13565	11386	WST85_1	CHALCO	México	México	2200
21	16795	13793	JSG319	CHALCO	México	México	2540
22	8768	8768	K68_1	CHALCO	México	México D. F.	2400
<b><i>Zea mays L. ssp. mays</i></b>							
23		861	SINA2	CHAPALOTE	México	Sinaloa	61
24		1374	PALOME8	PALOMERO	México	México	

La técnica usada para determinar el área de contacto de los granos individualmente durante el experimento; primeramente los granos se impregnaron en tinta para sellos con ayuda de un cojín y las piezas de papel de 10 mm x 10 mm fueron puestos encima del grano para que se imprimiera la superficie de contacto del grano durante la compresión. Debido a la forma del grano fue colocado en la placa de tal manera que el germen quedo de forma lateral (Figura 23). La impresión fue digitalizada y el área se calculó usando el software ImageJ versión 1.33o. El esfuerzo usado para evaluar las propiedades mecánicas del grano fue 0.5 mm de compresión con una velocidad de deformación de 0.1 mm/s con cinco conteos cíclicos, para las operaciones se utilizo el último conteo debido a la estabilidad. En este estudio se busco observar cómo se deforma el grano sin llegar a la ruptura, ya que si se rompe el grano no se observa la deformación.

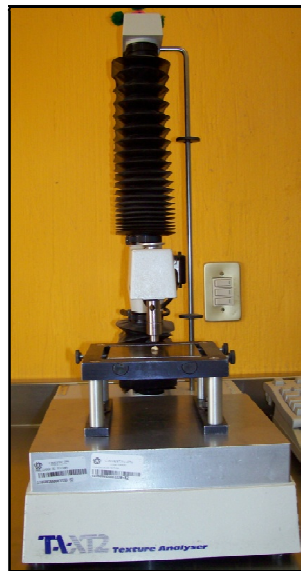


Figura 23. Medición de compresión con el texturómetro TA-XT2 los granos de teocintle.

#### V.2.1.3 Comportamiento viscoelástico.

El módulo de elasticidad (E) fue determinado a partir de una curva de esfuerzo-deformación, de acuerdo a la ecuación (1).

$$E = \sigma/\epsilon \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  (fuerza/área) es la tensión normal y  $\epsilon$  es la deformación, está definida en la ecuación (2).

$$\epsilon = [(L_o - L_f)/L_o] \times 100 \quad (2)$$

Donde  $L_o$  y  $L_f$  es la longitud inicial y final respectivamente, después de la compresión.

El comportamiento viscoelástico fue calculado usando la compresión de los granos, el trabajo de compresión fue determinado de una curva de carga/descarga (Figura 24). El área bajo la curva de carga proporciona el trabajo total realizado ( $W_T$ ) debido a la compresión. La deformación elástica ( $W_E$ ) del trabajo total fue deducido del área bajo la curva de descarga, y la energía absorbida por la deformación plástica es la diferencia entre los dos ( $W_P = W_T - W_E$ ) (Ponce y col., 2008).

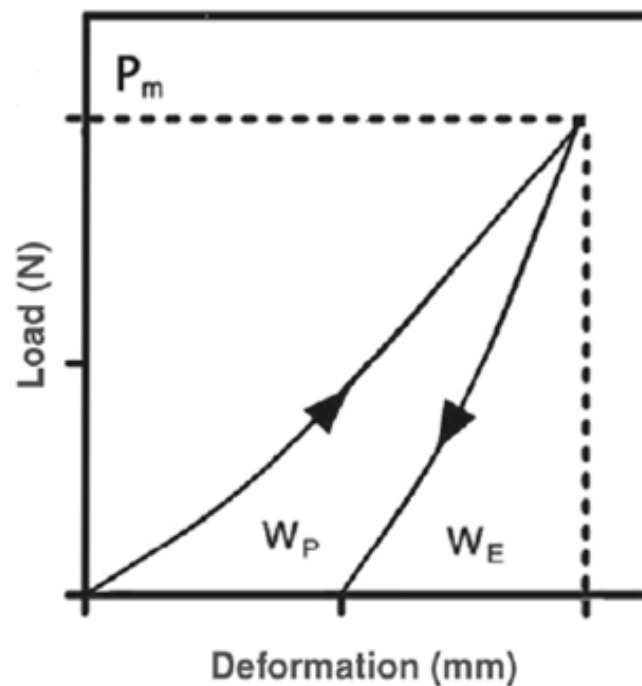


Figura 24. Ciclo de compresión. Carga (P); carga máxima ( $P_m$ );  $W_P$  trabajo plástico;  $W_E$  trabajo elástico realizado (Ponce y col., 2008).

## V.2.2 Extracción del almidón.

### V.2.2.1 Molienda.

Los diez granos sin cáscara de cada muestra, se trocearon y colocaron en un tubo de ensayo con 2 mL de agua por 24 horas debido a la dureza del grano; se molieron en un mortero de ágata (Figura 25) ya que se contaba con una muestra pequeña. Se recuperó la muestra molida en tubo de ensayo y se centrifugo a 2500 rpm por 10 minutos (Centrifuga Sigma 204), eliminando el agua con una micropipeta (PIPETMAN marca GILSON de 1000  $\mu$ L); posteriormente se secó en un horno Felisa a 40 °C.



Figura 25. Granos de teocintle colocados en un tubo de ensayo, para su posterior molienda en un mortero de ágata.

La muestra seca, nuevamente se molió en el mortero y se cribó en malla 60 (250  $\mu$ m), se colocó la muestra en tubos de precipitado para su posterior uso.

### V.2.2.2 Desengrasado.

La harina resultante de los 10 granos de cada muestra se le adicionó 6 mL de éter etílico, agitando vigorosamente por 30 minutos, de acuerdo a López (2011). Posteriormente se dejó reposar durante 2 horas y se separó la mezcla éter/grasa con una pipeta; repitiendo nuevamente todos los pasos. A continuación se secaron las muestras en un horno Felisa a 40 °C.

### V.2.2.3 Purificación del almidón.

Con las muestras desengrasadas, el siguiente paso fue extracción de proteínas; de acuerdo al método de Hamada (1997) y Gellrich y col. (2003), con algunas modificaciones. Cuatro disolventes fueron usados consecutivamente para la extracción de proteínas: H<sub>2</sub>O, NaCl 0.5 M, 2-propanol 55% y NaOH 0.1N, utilizando 6 mL de cada disolvente con agitación en Vortex (marca Thermolyne) para cada muestra. Primeramente se utilizó H<sub>2</sub>O a 4°C durante 45 minutos; seguido de NaCl 0.5 M a 4°C durante 60 minutos; H<sub>2</sub>O a 4°C durante 15 minutos; 2-propanol 55% a 20°C durante 75 minutos; NaOH 0.1N a 20°C durante 60 minutos; H<sub>2</sub>O para lavado (las que sean necesarias). Después del tiempo de extracción por solvente, se centrifugó a 2500 rpm durante 10 minutos.

Posteriormente al agua de lavado, se separó el almidón de la fibra con una micropipeta (PIPETMAN marca GILSON de 1000 µL) y se pasó a tubos eppendorf. El almidón recuperado en los tubos se secó en un horno Felisa a 40°C. Seco el almidón se molió en el mortero de ágata y fue cribado en malla 100 (149 µm); colocándolo nuevamente en tubos eppendorf.

### V.2.3 Grado de cristalinidad por difracción de rayos X.

Se empleó la técnica de difracción de rayos X, con un difractómetro Rigaku modelo DMAX-2100 (Figura 26), el cual opera a 30 kV y 16 mA con radiación CoK $\alpha$  y a una longitud de onda de  $\lambda=1.78899$  Å. Las muestras se pesaron (25 mg aprox. de cada una), y fueron colocadas en un porta muestra de vidrio. El ángulo de barrido fue de 5 a 35° sobre la escala 2 $\theta$  con intervalos de 0.2 (Gaytán y col., 2006).

### V.2.4 Propiedades térmicas.

#### V.2.4.1 Calorimetría diferencial de barrido.

Se usó un calorímetro de barrido diferencial (DSC Mettler Toledo modelo 821) para llevar a cabo los análisis térmicos. Se colocaron 3 mg del material molido y cribado en malla 100 (149 µm) y 7 µL de agua destilada en un crisol de aluminio con pin de 40 µL, el cual fue sellado por una prensa Mettler Toledo (Figura 27). Las muestra

fueron sometidas a calentamiento en el equipo a temperaturas de 30 a 100 °C, a una tasa de calentamiento de 10 °C/min (Narváez y col., 2007b). Los datos de cada transición como la gelatinización del almidón fueron guardados, teniendo al final termogramas con temperatura inicial (Ti), temperatura de pico (Tp) y temperatura final (Tf); así como la entalpia ( $\Delta H$ ) (Quintanar y col., 2009).



Figura 26. Equipo para difracción de rayos X.

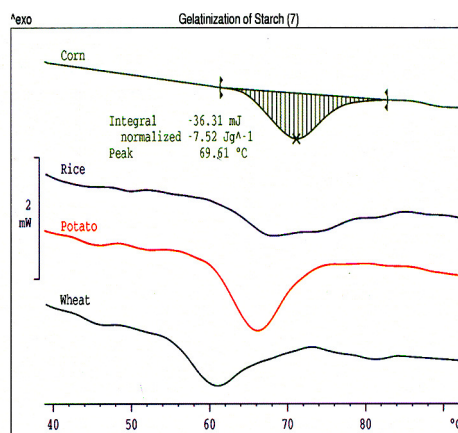


Figura 27. Equipo de calorimetría diferencial de barrido y termograma característico.

## V. 2. 5 Propiedades estructurales.

### V. 2. 5. 1 Dimensiones del cáscara y endospermo.

Tres a cuatro granos de cada muestra fueron fijados en pastillas de acrílico para lo cual se empleó un Kit AcryFix marca Struers. Estas fueron pulidas con una lija de agua para dejar expuesta el corte transversal de los granos.



Utilizando un estereoscopio Olympus y una cámara digital se tomaron fotos de las muestras montadas en las pastillas de acrílico (Figura 28); fueron guardadas con su respectivo código en archivos digitales para su posterior procesamiento. Con ayuda del software ImageJ versión 1.33o, en cada muestra se midió el área total, cáscara y endospermo de la sección transversal, para posteriormente expresarlo en porcentaje (Figuroa y col., 2011).

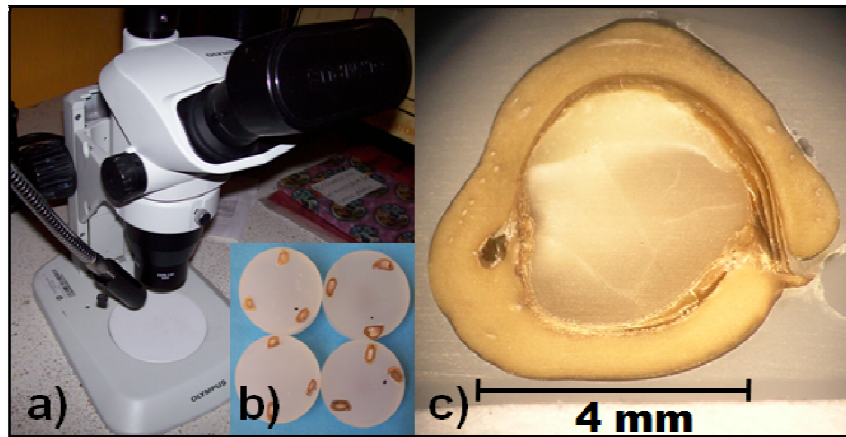


Figura 28. Imágenes: a) estereoscopio, b) granos de teocintle fijados y pulidos en acrílico, y c) vista del grano de teocintle con el estereoscopio.

#### V. 2. 5. 2 Microestructura: microscopía electrónica de barrido de bajo vacío (ESEM).

Se utilizó ESEM, debido a que se trabaja a bajo vacío, es decir a presión casi atmosférica, es mejor para visualizar diferencias o estructuras que son susceptibles al colapso, como la fase continua de agua-amilosa que se libera en el proceso de gelatinización (McDonough y col., 1997). Debido a que se buscaba observar el grado de compactación natural de los gránulos de almidón en el endospermo.

##### V. 2. 5. 2. 1 Preparación de las muestras y condiciones de operación de ESEM.

Las muestras colocadas en la pastilla de acrílico, como se mencionó anteriormente, fueron usadas para observar el tamaño del granulo de almidón y la capa de la aleurona.

El microscopio electrónico XL30 PHILIPS (Figura 29) se acondicionó para que trabajara en módulo de bajo vacío (ESEM), con un voltaje de aceleración de 15-20 kV y aproximadamente 50  $\mu$ A de corriente. El detector usado fue de tipo GSE (Gaseus Secondary Electron) y un spotsize del láser de 4.6-5.0.

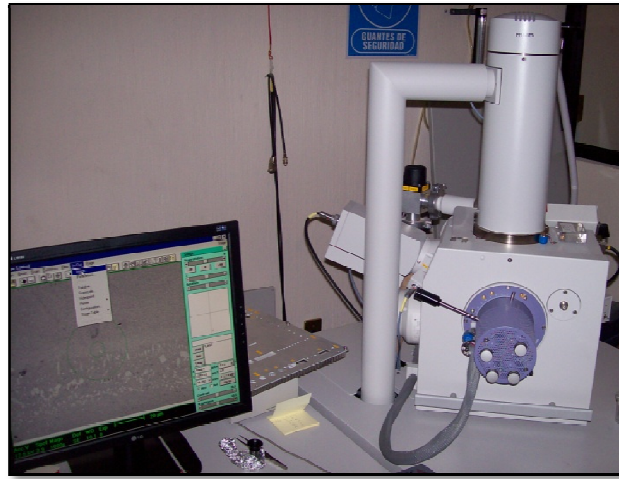


Figura 29. Microscopio electrónico XL30 PHILIPS.

#### V. 2. 5. 2. 2 Captación de imágenes.

Una vez preparadas y montadas las muestras, se procedió a colocarlas en la placa y a ajustar el equipo a las condiciones antes mencionadas. Se procedió a realizar las lecturas en las diferentes áreas del grano ajustando la luminosidad, brillo y contraste de la imagen así como la escala de la misma. Las imágenes fueron guardadas en archivos digitales para su posterior procesamiento. En cada muestra se analizó las celdas formadas en el endospermo y la capa de la aleurona.

#### V. 2. 5. 2. 3 Lectura y procesamiento de datos.

Se midió el tamaño de 30 gránulos de almidón, así como la forma que presentaban las celdas y los gránulos. El tamaño es la medida del diámetro que proyectan los gránulos de almidón en la micrografía. Dicha medición se realizó con el software ImageJ versión 1.33o, se calculó el promedio para cada muestra. El tamaño y forma del gránulo de almidón sirve para predecir la reología de sus geles (Wilson y col., 2006).

### V. 3 Análisis estadístico.

Se utilizó un diseño completamente al azar de las 24 muestras con la prueba Tukey's considerando alta significancia a una  $P \leq 0.05$ , utilizando el software Statistical Analysis System (SAS, 2009).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### VI. 1 Características físicas del grano.

De acuerdo a las dimensiones tomadas los granos de teocintle con cáscara de todas las razas presentan: largo entre 4.89-9.62 mm, alto 2.80-7.46 mm y ancho 2.10-5.66 mm, los cuales tenían una forma trapezoidal o triangular dependiendo de la raza (Figura 30 y Cuadro 5); los granos más largos se presentaron en la muestra 420532 (*Zea nicaraguensis*), 13451 y 9478 (*Zea luxurians*), los granos más cortos en la muestra 13566 (Nobogame: *Zea mays* ssp. *mexicana*) y 8784 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*); granos más altos pertenecen a la muestra 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*), y los granos pequeños altos son de la muestra 8784 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*); mientras que los granos más anchos son de la muestra 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*), y menos anchos la muestra 8784 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*); por lo que los granos más pequeños son de la muestra 8784 de la raza Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis* (Cuadro 5).

En los granos sin cáscara de todas las razas presentan un largo entre un rango 2.47-6.03 mm, alto 1.99-4.63 mm y ancho 1.66-4.41 mm (Figura 31); por lo cual los granos más largos son de la muestra 13451 (*Zea luxurians*) y cortos 13566 (Nobogame: *Zea mays* ssp. *mexicana*), los granos más altos 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*) y menos altos 8837 (*Zea perennis*), los granos más anchos 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*) y menos anchos 8784 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*) (Cuadro 6). Por lo tanto son granos relativamente pequeños en comparación con el maíz Chapalote y palomero (*Zea mays* L. ssp. *mays*), ya que estos presentan: largo entre 6.93-11.9 mm, alto 4.25-8.74 mm y ancho 2.82-6.20 mm.

Iltis y col. (1979), reportaron que el *Zea diploperennis* presenta un grano con forma trapezoidal-cilíndrica, con un largo de 6 a 8.2 mm, de alto o lado corto de 2.5 a 4.5, y de ancho (diámetro) 4 a 5 mm; con un color sepia claro a grisáceo con manchas café oscuro o negro.

En CONABIO (2008b), reportan la localización de teocintle en el estado de Michoacán, en donde el teocintle Balsas tiene una longitud de 5.37 mm, ancho 4.09 mm, longitud gluma (grano sin cáscara) 5.08 mm y el peso de 100 semillas 4.90 g; teocintle Mesa Central Cuitzeo tiene una longitud de 5.30 mm, ancho 6.14 mm, longitud gluma (grano sin cáscara) 7.06 mm y el peso de 100 semillas 10.71 g; y teocintle Mesa Central Chápala con una longitud de 5.24 mm, ancho 4.88 mm, longitud gluma (grano sin cáscara) 6.67 mm y el peso de 100 semillas 6.83 g.

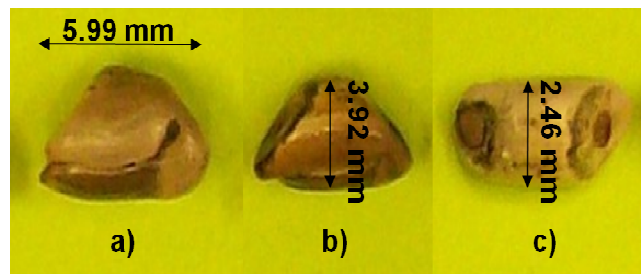


Figura 30. Dimensiones del grano de teocintle con cáscara de la raza *Zea mays ssp. parviglumis*.

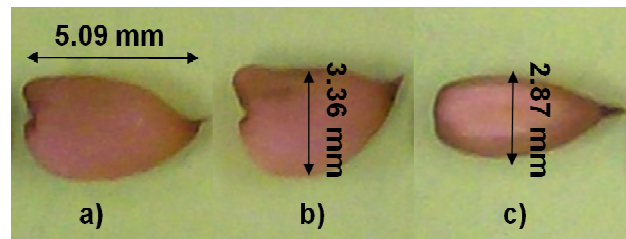


Figura 31. Dimensiones del grano de teocintle sin cáscara de la raza *Zea mays ssp. parviglumis*.

La dureza del grano es un factor de calidad importante en el maíz. Cultivos de maíz con granos duros son menos susceptibles a los daños durante la cosecha, el transporte y manipulación (Dombrink y Knutson, 1997).

La fuerza de compresión del grano de teocintle con cáscara no presenta diferencias significativas de todas las razas, con un rango de 81.69-96.06 N (8.32-9.79 Kgf), de acuerdo al Cuadro 5.

Cuadro 5. Características físicas y visuales del grano entero de teocintle (con cáscara).

Núm. Id.	Raza/Complejo Racial	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Fuerza Compresión (N)	Forma/Color
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>						
9475	<i>Zea perennis</i>	7.45abcd	4.45cdefg	3.35defghi	83.08a	Trapezoidal/sepia, café oscuro manchas negras
8837	<i>Zea perennis</i>	6.65def	3.65hi	2.94hij	81.69a	Trapezoidal/sepia, café manchas café oscuro-negro
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>						
10003	<i>Zea diploperennis</i>	7.71abc	4.30cdefgh	3.62bcdefg	86.46a	Trapezoidal/sepia, café con machas café oscuro
9476	<i>Zea diploperennis</i>	7.40abcd	4.22defgh	3.59bcdefgh	90.75a	Trapezoidal/sepia, café grisáceo manchas café oscuro-negro
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>						
13451	<i>Zea luxurians</i>	8.35a	4.48bcdef	3.69bcdef	96.02a	Trapezoidal/café grisáceo
9478	Guatemala	8.25a	4.10defgh	3.43cdefghi	87.27a	Trapezoidal/sepia, café oscuro
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>						
420532	<i>Zea nicaraguensis</i>	8.38a	4.11defgh	3.53cdefgh	81.96a	Trapezoidal/sepia manchas café oscuro-negro
<b><i>Zea mays ssp. huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>						
9479	Huehuetenango	7.20bcd	4.00efgh	3.27fghi	91.83a	Trapezoidal/sepia, café grisáceo con manchas café oscuro
<b><i>Zea mays ssp. parviglumis</i>, Iltis y Doebley</b>						
8785	Balsas	5.68fg	3.78fghi	2.83ij	92.40a	Triangular/sepia, café oscuro con manchas café oscuro-negro
9477	Balsas	6.98cde	4.13defgh	3.24fghij	88.67a	Trapezoidal/sepia, café oscuro con manchas café oscuro-negro
8762	Balsas	6.61cdefg	3.68ghi	2.93ghij	85.38a	Trapezoidal y triangular/sepia, café oscuro con manchas café oscuro
13567	Balsas	7.53abcd	4.81bcd	3.83bcdef	88.75a	Triangular/sepia, café oscuro con manchas café oscuro-negro
8784	Balsas	5.49g	3.22i	2.61j	95.17a	Trapezoidal/sepia, café grisáceo manchas café oscuro-negro
8767	Balsas	6.90cde	4.20defgh	3.23fghij	83.83a	Triangular/sepia manchas café oscuro-negro
<b><i>Zea mays ssp. mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>						
13552	Mesa Central	6.62def	4.67bcde	3.25efghij	88.81a	Triangular/sepia, café con machas café oscuro
13573	Mesa Central	6.80cde	5.19b	3.93bcde	83.65a	Triangular/sepia, café grisáceo con manchas negras
13571	Durango	6.11efg	4.35cdefgh	3.27fghi	92.83a	Triangular/sepia, café oscuro con manchas café oscuro-negro
13566	Nobogame	5.56g	4.17defgh	3.38cdefgh	81.88a	Triangular/sepia, café con machas café oscuro
8753	Chalco	8.14ab	6.40a	4.99a	93.71a	Triangular/sepia, café oscuro con manchas café oscuro-negro
13565	Chalco	6.91cde	5.20b	4.01bc	92.59a	Triangular/sepia, café con machas café oscuro
16795	Chalco	7.45abcd	5.18b	4.19b	84.14a	Triangular/sepia, café oscuro manchas negras
8768	Chalco	7.46abcd	5.02bc	4.00bcd	85.92a	Triangular/café grisáceo manchas café oscuro-negro

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

Los granos sin cáscara si presentan diferencias significativas (Cuadro 6), con estos granos se compararon los maíces Chapalote y palomero; la muestra más suave

Cuadro 6. Características físicas del grano de teocintle sin cáscara.

Núm. Id.	Raza/ Complejo Racial	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Fuerza Compresión (N)
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>					
9475	<i>Zea perennis</i>	4.25ghijk	3.29efghi	2.46fgh	83.53ab
8837	<i>Zea perennis</i>	4.07hijk	2.60j	2.42fgh	82.86ab
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>					
10003	<i>Zea diploperennis</i>	4.54defghij	3.1ghij	2.60efgh	76.46b
9476	<i>Zea diploperennis</i>	4.34fghijk	3.14ghij	2.61efgh	86.06ab
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>					
13451	<i>Zea luxurians</i>	5.41c	3.60defg	2.91cdef	95.11a
9478	Guatemala	5.24cd	3.16ghij	2.59efgh	86.19ab
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>					
420532	<i>Zea nicaraguensis</i>	5.15cde	3.20fghij	2.67defgh	90.49ab
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>					
9479	Huehuetenango	4.22ghijk	2.90hij	2.44fgh	93.65a
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>					
8785	Balsas	3.88jk	3.05ghij	2.25gh	88.02ab
9477	Balsas	4.65cdefghi	3.33defgh	2.62efgh	93.53a
8762	Balsas	4.19hijk	2.85hij	2.26gh	88.11ab
13567	Balsas	4.84cdefgh	3.39defgh	2.89cdef	91.77a
8784	Balsas	3.90ijk	2.68ij	2.11h	89.11ab
8767	Balsas	4.76cdefgh	3.20fghij	2.61efgh	91.10ab
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>					
13552	Mesa Central	4.47defghijk	3.49defgh	2.53fgh	86.37ab
13573	Mesa Central	4.43efghijk	3.86cde	3.01cdef	84.22ab
13571	Durango	4.11hijk	3.17ghij	2.61efgh	82.39ab
13566	Nobogame	3.76k	3.10ghij	2.86cdefg	83.84ab
8753	Chalco	4.98cdefg	4.26c	3.67b	89.48ab
13565	Chalco	4.74cdefgh	3.97cd	3.28bcd	86.77ab
16795	Chalco	5.04cdef	3.83cdef	3.39bc	89.57ab
8768	Chalco	4.75cdefgh	3.69cdefg	3.22bcde	85.66ab
<b><i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i></b>					
861	Chapalote (SINA2)	8.62b	7.23a	4.69a	95.71a
1374	Palomero (PALOME8)	10.15a	5.27b	3.82b	91.54ab

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

presentó una media de 76.46 N (7.79 Kgf) correspondiente a la muestra 10003 (*Zea diploperennis*), las muestras 13451 (*Zea luxurians*), 9479 (*Zea mays ssp. huehuetenangensis*), 9477 y 13567 (Balsas: *Zea mays ssp. parviglumis*) son los más duros con un rango de medias de 91.77-95.71 N (9.35-9.76 Kgf), dentro de los cuales se localizó al maíz Chapalote. Por lo que en general en cuanto a dureza los granos de teocintle están dentro de los dos valores.

Además, las diferencias en la dureza puede ser causada por la amilopectina o diferencias estructurales granulares debido a la naturaleza y el contenido de proteínas en el endospermo (Dombrink y Knutson, 1997).

También la dureza del grano nos da información de calidad, es decir que tanta energía utiliza la molienda del grano para determinar condiciones de almacenamiento y procesamiento (Stasiak y col., 2007).

## VI. 2 Características mecánicas y viscoelásticas.

Las propiedades mecánicas y viscoelásticas de los granos, tiene que ver con la reología, la cual es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Un concepto formal del término reología es: parte de la mecánica que estudia la elasticidad, plasticidad y viscosidad de la materia (Steffe, 1996).

Los alimentos en general reaccionan de forma muy diferente ante la aplicación de un esfuerzo. Unos son sólidos duros y se rompen bruscamente ante un esfuerzo elevado, otros sólidos se deforman para terminar rompiéndose (en general la mayoría de los alimentos sólidos tienen este comportamiento) (Steffe, 1996).

Un método práctico y apropiado para evaluar otras propiedades mecánicas fundamentales en granos de trigo como el módulo de elasticidad, esfuerzo, resistencia a la compresión, así como las propiedades viscoelásticas como trabajo elástico y plástico, puede aumentar la eficiencia de la selección del grano para su procesamiento, comercialización y uso. La dureza es una característica del grano y se define como la resistencia a la deformación contra la fuerza aplicada (esfuerzo)



y es en gran parte determinada por las propiedades del endospermo (Greffeuille y col., 2006; Ponce y col., 2008). En los granos, la evaluación de las propiedades mecánicas es particularmente difícil debido a que estos parámetros pueden ser muy afectados por el porcentaje de la deformación, la temperatura y humedad (Ponce y col., 2008).

En los granos de teocintle con y sin cáscara se evaluaron las propiedades mecánicas y viscoelásticas, utilizando una sonda plana a una velocidad de 0.1 mm/seg y una penetración 0.5 mm (Cuadro 7 y 8). Se realizaron de acuerdo al método de Ponce y col. (2008) aplicado en trigo. En cuanto al comportamiento elástico en los granos de teocintle con cáscara, en la mayoría de los casos, la porción inicial de la curva fuerza-deformación (Figura 32 y 33) presenta pequeña linealidad acompañada con deformación hasta ciertos niveles, por lo que después continua lineal, de acuerdo a Ponce y col. (2008), mencionan que el trigo duro presenta una curva más lineal que los trigos suaves, por lo que los teocintles serían considerados todos duros; por lo que son mas elásticos, según la forma de la gráfica (Figura 32 y 33).

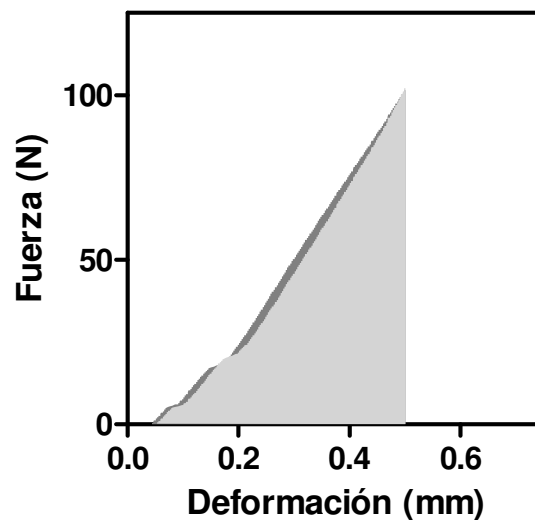


Figura 32. Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8784 (Balsas: *Zea mays ssp. parviglumis*) con cáscara deformación mayor.

Cuadro 7. Propiedades mecánicas y viscoelásticas de granos de teocintle con cáscara.

Núm. Id.	Raza/ Complejo Racial	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	Modulo de Young (MPa)	WT (10 <sup>-3</sup> N-m)	WE (10 <sup>-3</sup> N-m)	WP (10 <sup>-3</sup> N-m)	DE (%)	DP (%)
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>									
9475	Zea perennis	36.23ab	0.15cdefg	240.46ab	14.75a	14.05a	0.70abcd	95.27ab	4.73ab
8837	Zea perennis	27.52ab	0.17abc	163.07b	14.73a	13.88a	0.85a	94.09b	5.91a
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>									
10003	Zea diploperennis	35.16ab	0.14efgh	259.31ab	15.93a	15.25a	0.68abcd	95.61ab	4.39ab
9476	Zea diploperennis	42.79ab	0.14defgh	313.09ab	16.52a	15.84a	0.68abcd	95.88ab	4.12ab
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>									
13451	Zea luxurians	30.92ab	0.14efgh	228.74ab	17.97a	17.43a	0.55cd	96.89a	3.11b
9478	Guatemala	32.74ab	0.15cdefg	228.89ab	15.73a	15.05a	0.68abcd	95.60ab	4.40ab
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>									
420532	Zea nicaraguensis	36.35ab	0.14defgh	260.03ab	14.65a	14.03a	0.62abcd	95.62ab	4.38ab
<b><i>Zea mays ssp. huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>									
9479	Huehuetenango	30.64ab	0.15bcdefg	199.79ab	16.94a	16.30a	0.64abcd	95.99ab	4.01ab
<b><i>Zea mays ssp. parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>									
8785	Balsas	40.14ab	0.18ab	226.83ab	16.65a	15.98a	0.66abcd	95.82ab	4.18ab
9477	Balsas	31.60ab	0.16bcde	203.82ab	15.74a	15.16a	0.58bcd	96.02ab	3.98ab
8762	Balsas	31.06ab	0.17abcd	183.30ab	15.22a	14.50a	0.72abcd	94.84ab	5.16ab
13567	Balsas	46.54a	0.13efgh	363.45a	16.36a	15.73a	0.63abcd	96.12ab	3.88ab
8784	Balsas	43.98ab	0.19a	227.42ab	17.46a	16.66a	0.80abc	95.40ab	4.60ab
8767	Balsas	36.54ab	0.16bcde	236.35ab	15.07a	14.24a	0.83ab	94.33b	5.67a
<b><i>Zea mays ssp. mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>									
13552	Mesa Central	36.15ab	0.16bcde	249.51ab	15.97a	15.30a	0.67abcd	95.53ab	4.47ab
13573	Mesa Central	46.12a	0.13fgh	356.58a	14.98a	14.33a	0.65abcd	95.44ab	4.56ab
13571	Durango	41.01ab	0.15bcdef	266.87ab	16.82a	16.13a	0.69abcd	95.82ab	4.18ab
13566	Nobogame	38.93ab	0.15cdefg	258.71ab	14.04a	13.41a	0.63abcd	95.19ab	4.81ab
8753	Chalco	20.75b	0.10i	211.15ab	17.53a	17.01a	0.52d	97.01a	2.99b
13565	Chalco	31.38ab	0.13fgh	256.35ab	17.05a	16.45a	0.60abcd	96.37ab	3.63ab
16795	Chalco	27.97ab	0.12hi	236.62ab	15.34a	14.78a	0.56cd	95.92ab	4.08ab
8768	Chalco	34.16ab	0.13ghi	273.12ab	15.39a	14.80a	0.59bcd	96.12ab	3.88ab

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una P≤0.05.

WT = Trabajo Total; WE = Trabajo Elástico; WP = Trabajo Plástico; DE = Grado de Elasticidad y DP = Grado de Plasticidad.

En cuanto a la deformación que presentaron los granos de teocintle sin cáscara la media más alta correspondió a un grano pequeño 8784 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*) con un valor de 0.239% y un valor más bajo a un grano grande 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*) con un valor de 0.138%; debido a que la fuerza de carga presentaba una mayor compresión en un grano pequeño, por lo que tenía una mayor área de contacto (Cuadro 8).

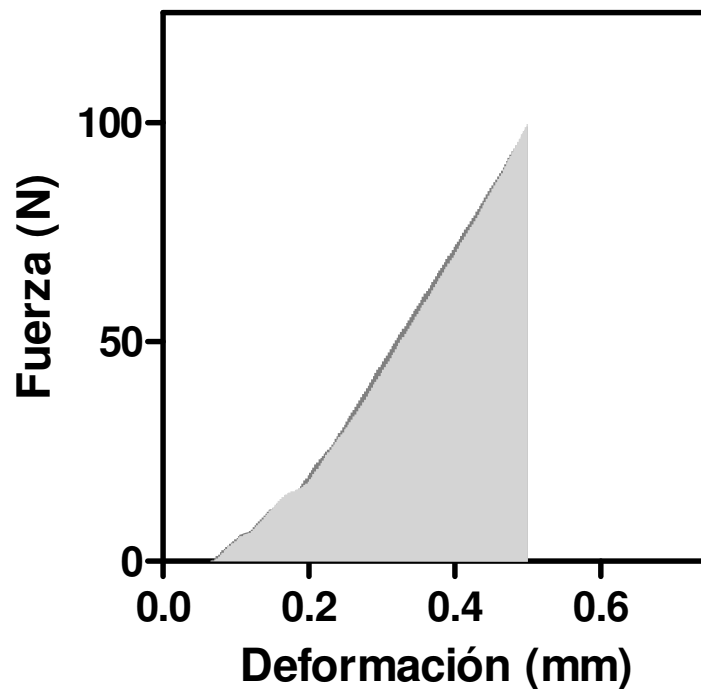


Figura 33. Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*) con cáscara con deformación menor.

En granos con cáscara, si se comparan las curvas de esfuerzo-deformación granos duros se comportan como material elástico y los granos suaves se comportan como un material más plástico, estos granos serían más suaves en comparación con los de sin cáscara, además granos más suaves requieren menos energía a la deformación que los granos duros (Ponce y col., 2008); pero sin embargo no sería razonable, para esto se tiene que adentrar a la forma del grano de teocintle, el cual

está protegido por una cáscara llamado raquis, seguido de una gluma externa (Figura 34), por lo que al momento de la compresión solo se afectó el raquis por lo que pareciera que estuviera suave. Se refleja en los valores de deformación, la media más alta la presenta el grano 8784 (Balsas: *Zea mays ssp. parviglumis*, son granos pequeños) con un valor de 0.193% y la media más baja corresponde a la muestra 8753 (Chalco: *Zea mays ssp. mexicana*, granos grandes) valor de 0.101%.

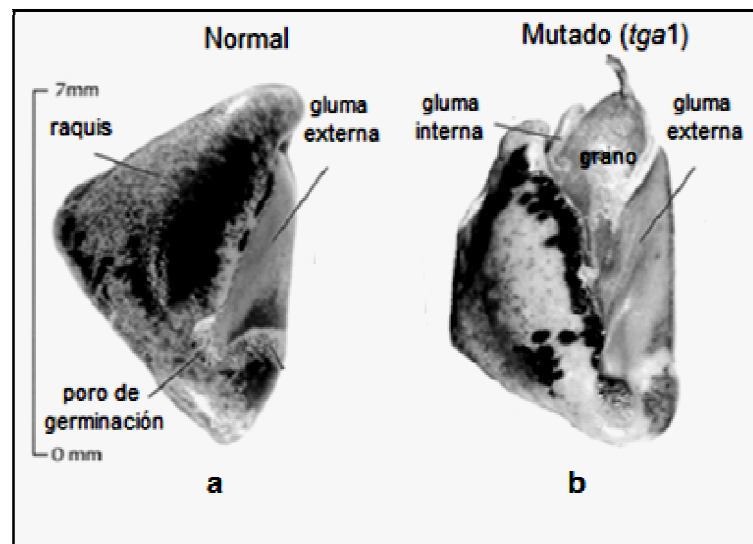


Figura 34. Cápsula endurecida del teocintle Balsas (*Z. mays ssp. parviglumis*), normal y mutado: (a) fruto normal, se muestra con el raquis invaginado, la gluma rodea al grano; (b) el grano se presenta expuesto, se observa más claramente las cáscaras que envuelven al grano (Iltis, 2000).

Además de acuerdo a Figueroa y col. (2011), en un estudio en granos de trigo, mencionan que en las curvas de fuerza-deformación exhiben varios puntos de inflexión, estos fueron detectados usando la primera derivada de las curvas de fuerza-deformación, para detectar las diferentes cascarillas (endospermo) del grano entero en conjunto con micrográficas. Por lo que observando las gráficas de fuerza-deformación de los granos de teocintle con cáscara en la muestra 8784 (Balsas: *Zea mays ssp. parviglumis*) se observan tres puntos de inflexión (Figura 35), a los que corresponderían las capas del raquis, gluma externa y gluma interna, se detectaron tres puntos debido a que es un grano pequeño (mayor área de

Cuadro 8. Propiedades mecánicas y viscoelásticas de granos de teocintle sin cáscara y la referencia de maíz.

Núm. Id.	Raza/ Complejo Racial	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	Modulo de Young (MPa)	WT (10 <sup>-3</sup> N-m)	WE (10 <sup>-3</sup> N-m)	WP (10 <sup>-3</sup> N-m)	DE (%)	DP (%)
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>									
9475	Zea perennis	35.29abc	0.21abc	173.71c	14.20ab	13.48ab	0.72ab	94.83abc	5.17abc
8837	Zea perennis	35.95abc	0.22ab	180.03c	14.31ab	13.31ab	0.99ab	92.71c	7.29a
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>									
10003	Zea diploperennis	40.52abc	0.19bcd	210.28abc	12.79b	12.07b	0.72ab	94.40abc	5.60abc
9476	Zea diploperennis	43.67abc	0.19bcde	227.49abc	15.08ab	14.17ab	0.91ab	93.97abc	6.03abc
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>									
13451	Zea luxurians	35.90abc	0.17cdefgh	206.99abc	18.13a	17.45a	0.69ab	96.10a	3.90c
9478	Guatemala	39.23abc	0.20bcd	202.32abc	15.04ab	14.29ab	0.75ab	94.82abc	5.18abc
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>									
420532	Zea nicaraguensis	39.41abc	0.19bcdef	214.81abc	16.13ab	15.43ab	0.70ab	95.61ab	4.39bc
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>									
9479	Huehuetenango	49.80ab	0.21abc	248.82abc	17.55a	16.62ab	0.93ab	94.57abc	5.43abc
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>									
8785	Balsas	37.26abc	0.22ab	170.28c	15.59ab	14.78ab	0.82ab	94.64abc	5.36abc
9477	Balsas	41.07abc	0.19bcdef	215.19abc	17.20ab	16.46ab	0.73ab	95.55ab	4.45bc
8762	Balsas	45.13ab	0.22ab	203.44abc	15.94ab	15.25ab	0.69ab	95.40ab	4.60bc
13567	Balsas	51.21a	0.17cdefg	296.11abc	16.41ab	15.67ab	0.74ab	95.51ab	4.49bc
8784	Balsas	48.44ab	0.24a	202.22bc	16.17ab	15.15ab	1.02a	93.63abc	6.37abc
8767	Balsas	44.84ab	0.19bcde	232.36abc	16.25ab	15.53ab	0.72ab	95.55ab	4.45bc
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>									
13552	Mesa Central	47.82ab	0.20bcd	245.08abc	15.15ab	14.40ab	0.76ab	94.79abc	5.21abc
13573	Mesa Central	46.04ab	0.17defghi	278.77abc	14.42ab	13.57ab	0.86ab	93.93abc	6.07abc
13571	Durango	36.23abc	0.19bcdef	188.80bc	14.09ab	13.14ab	0.96ab	93.12bc	6.88ab
13566	Nobogame	49.71ab	0.18cdefg	287.81abc	14.38ab	13.52ab	0.86ab	94.07abc	5.93abc
8753	Chalco	41.36abc	0.14hij	308.51abc	17.11ab	16.44ab	0.68ab	95.98a	4.02c
13565	Chalco	50.63a	0.16fghi	344.44a	15.05ab	14.37ab	0.68ab	95.44ab	4.56bc
16795	Chalco	48.29ab	0.15ghi	329.04ab	15.85ab	15.21ab	0.64b	95.91a	4.09c
8768	Chalco	4.95abc	0.16efghi	265.46abc	14.52ab	13.82ab	0.69ab	95.184abc	4.82abc
<b><i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i></b>									
861	Chapalote (SINA2)	23.68c	0.11j	228.29abc	17.84a	17.09a	0.75ab	95.80a	4.20c
1374	Palomero (PALOME8)	29.44bc	0.13ij	224.83abc	16.51ab	15.80ab	0.70ab	95.33abc	4.67abc

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

WT = Trabajo Total; WE = Trabajo Elástico; WP = Trabajo Plástico; DE = Grado de Elasticidad y DP = Grado de Plasticidad.

contacto). En la muestra 8753 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*) se observan dos punto de inflexión por lo que correspondería al raquis y gluma externa (Figura 36), éste es un grano grande por lo que se interpreta que no alcanzo a penetrar las otras capas.

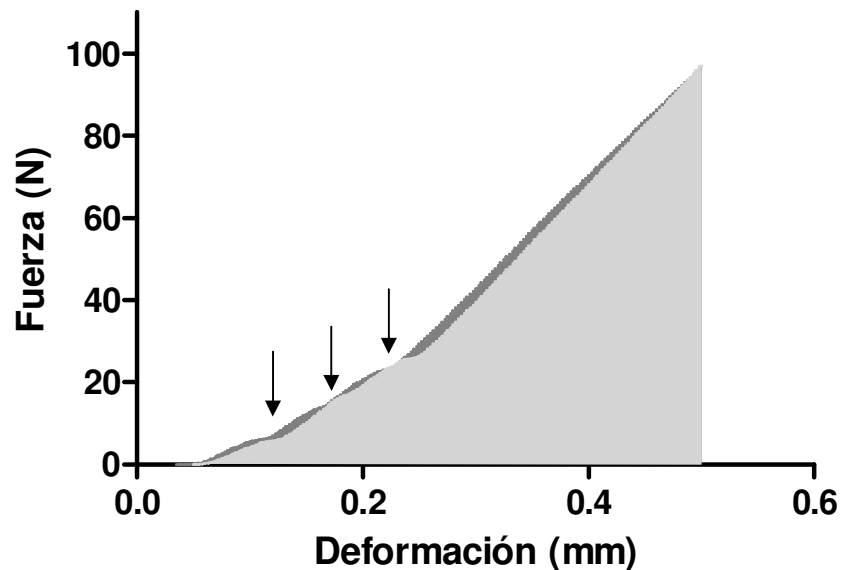


Figura 35. Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8784  
(Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*) grano pequeño.

Las curvas de esfuerzo-deformación mostraron las características típicas bifásicas de un material elástico-plástico, la primera parte de la curva (fase elástica) corresponde a la deformación reversible de los tejidos. La segunda parte de la curva (etapa plástica) corresponde a un daño irreversible de los tejidos hasta su ruptura (Greffeuille y col., 2006).

En lo referente al módulo, en los granos de teocintle todas las muestras sin excepción presentaban un endospermo duro con gránulo compacto vítreo. Rodríguez (2010), presenta valores para el módulo elástico en maíz con endospermo duro de 257.8 MPa con una dureza de 61.75 N (6.29 Kgf). En los granos de teocintle se presentaron un rango de medias entre 344.42-170.28 MPa (Cuadro 8).

Ponce y col. (2008), muestran resultados donde el grano más duro presenta un trabajo total alto y en trigos suaves bajo, además Figueroa y col. (2011) reportaron que en trigos duros con una humedad de 12.7% presentaban un trabajo total de  $17.5 \times 10^{-3}$  N-m, mientras que en trigos suaves con 13% de humedad presenta un trabajo total de  $14.0 \times 10^{-3}$  N-m, por lo que en los granos de teocintle presentan un trabajo total con medias en un rango de  $18.13-12.79 \times 10^{-3}$  N-m; pero sin embargo de acuerdo a análisis microestructurales no hay teocintles con almidón suave por lo que en estos estudios no se pueden comparar completamente pero la tendencia si es similar.

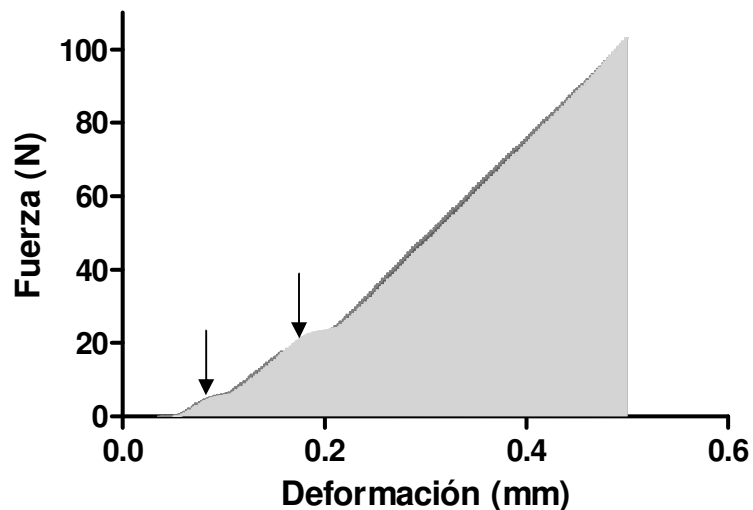


Figura 36. Gráfica fuerza-deformación de la muestra 8753  
(Chalco: *Zea mays ssp. mexicana*) grano grande.

En la tecnología de molienda de trigo, el molinero tiene como objetivo el mejorar separar el endospermo, que se recupera como harina blanca, las capas exteriores es llamado salvado. El salvado de trigo está compuesto de pericarpio, testa, y la capa de aleurona con algunos restos adjuntos de endospermo. Por lo cual es importante la medición de las propiedades mecánicas. Un estudio reportado por Antoine y col. (2003), mencionan que el pericarpio del grano de trigo exhibe un comportamiento reológico lineal elástico, la plasticidad puede ser considerada

como la característica única mecánica que permite que se distingan tres capas del grano (pericarpio, capas intermedias y capa de aleurona).

Pero aplicado a los granos de teocintle, se enfrentaría a doble trabajo para llegar a la parte del endospermo, ya que primeramente se tendría que retirar la cáscara que envuelve al grano, posteriormente capas delgadas para terminar con la capa de la aleurona.

También se realizó un análisis estadístico tomando en cuenta el grupo racial o taxonómico de los teocintles por lo que es más fácil ver las diferencias entre cada grupo. En el Cuadro 9 se observan que las propiedades mecánicas y viscoelásticas de los granos con cáscara sigue la tendencia antes mencionada es decir, son granos duros y por lo tanto son elásticos, además de que en cuanto a la deformación siguió la misma tendencia que en las razas individuales la mayor deformación *Zea mays ssp. parviglumis* y la menor *Zea mays ssp. mexicana*.

Cuadro 9. Propiedades mecánicas y viscoelásticas del teocintle con cáscara acomodados por género.

Género o Grupo Taxonómico	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	Modulo de Young (MPa)	WT (10 <sup>-3</sup> N-m)	WE (10 <sup>-3</sup> N-m)	WP (10 <sup>-3</sup> N-m)	DE (%)	DP (%)
<i>Zea perennis</i>	82.38a	31.87a	0.16ab	201.76a	14.74a	13.97a	0.77a	94.68b	5.32a
<i>Zea diploperennis</i>	88.61a	38.97a	0.14bc	286.20a	16.23a	15.55a	0.68abc	95.75ab	4.25ab
<i>Zea luxurians</i>	91.64a	31.83a	0.14bc	228.81a	16.85a	16.24a	0.61bc	96.24a	3.76b
<i>Zea nicaraguensis</i>	81.96a	36.35a	0.14bc	260.03a	14.65a	14.03a	0.62abc	95.62ab	4.38ab
<i>Zea mays ssp. huehuetenangensis</i>	91.83a	30.65a	0.15abc	199.79a	16.94a	16.30a	0.64abc	96.00ab	4.00ab
<i>Zea mays ssp. parviglumis</i>	89.33a	38.59a	0.16a	241.13a	16.14a	15.44a	0.70ab	95.46ab	4.54ab
<i>Zea mays ssp. mexicana</i>	87.93a	37.54a	0.14c	263.79a	15.89a	15.27a	0.61c	95.93a	4.07b

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

WT = Trabajo Total; WE = Trabajo Elástico; WP = Trabajo Plástico; DE = Grado de Elasticidad y DP = Grado de Plasticidad.

En el Cuadro 10, se muestra el promedio de cada grupo racial de teocintle sin cáscara, se observan valores más altos en deformación en comparación con los granos de teocintle con cáscara; tanto el Cuadro 9 y 10 muestran características diferentes por lo que no se pueden hacer una comparación amplia.



Cuadro 10. Propiedades mecánicas y viscoelásticas del teocintle sin cáscara acomodados por género.

Género o Grupo Taxonómico	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	Modulo de Young (MPa)	WT ( $10^{-3}$ N-m)	WE ( $10^{-3}$ N-m)	WP ( $10^{-3}$ N-m)	DE (%)	DP (%)
<i>Zea perennis</i>	83.21bc	35.61 ab	0.21 a	176.71b	14.25bc	13.40bc	0.93a	93.83b	6.17a
<i>Zea diploperennis</i>	81.26c	42.10a	0.19ab	218.89ab	13.94c	13.12c	0.82a	94.18ab	5.82ab
<i>Zea luxurians</i>	90.89ab	37.47ab	0.19bc	240.78b	16.67abc	15.95ab	0.72a	95.49ab	4.51ab
<i>Zea nicaraguensis</i>	90.49abc	39.41 ab	0.19abc	214.81 ab	16.13abc	15.43abc	0.70a	95.61 ab	4.39ab
<i>Zea mays ssp. huehuetenangensis</i>	93.65ab	49.80a	0.21ab	248.82ab	17.55ab	16.61ab	0.93a	94.57ab	5.43ab
<i>Zea mays ssp. parviglumis</i>	90.26ab	44.66a	0.21a	219.72b	16.26ab	15.47ab	0.79a	95.04ab	4.96ab
<i>Zea mays ssp. mexicana</i>	86.04bc	45.13a	0.17c	280.99a	15.07abc	14.31abc	0.76a	94.80ab	5.20ab
<i>Zea mays L. ssp. Mays</i>	93.63 <sup>a</sup>	26.56b	0.12d	226.56ab	17.17a	16.45a	0.72a	95.57a	4.43b

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

WT = Trabajo Total; WE = Trabajo Elástico; WP = Trabajo Plástico; DE = Grado de Elasticidad y DP = Grado de Plasticidad.

### VI. 3 Propiedades estructurales y microestructurales.

Tres a cuatro granos de cada muestra fueron fijados en pastillas de acrílico (Figura 37) de acuerdo al método de Figueroa y col. (2011), con ayuda del software ImageJ versión 1.33o, en cada muestra se midió el área total, cáscara y endospermo de la sección transversal, para posteriormente expresarlo en porcentaje (Cuadro 11).

Se observa en la Figura 37, que la muestra 8785 (Balsas) tiene menor grosor de cáscara (43.23%), por lo tanto mayor porcentaje de endospermo (56.77%); en comparación con la muestra 9476 (*Zea diploperennis*) la cual tiene mayor grosor de la cáscara (70.98%) y menor porcentaje de endospermo (29.02%) (Cuadro 11).

En la Figura 38 se muestra la mazorca del teocintle con sus partes, por lo que se puede comparar con la Figura 37, donde se observa endospermo, germen, gluma externa y el raquis.

Los aspectos microestructurales abarcan investigación como: tamaño del gránulo de almidón suave y duro, grado de compactación, grosor del pericarpio y aleurona, morfología del gránulo. Por lo que en todas las razas de teocintle se realizaron mediciones con ayuda del software ImageJ versión 1.33o (Cuadro 11), hay que

recordar que se observó al grano montado en una pastilla de acrílico y pulido, por lo que se muestra el corte transversal del mismo (Figura 39 y 40).

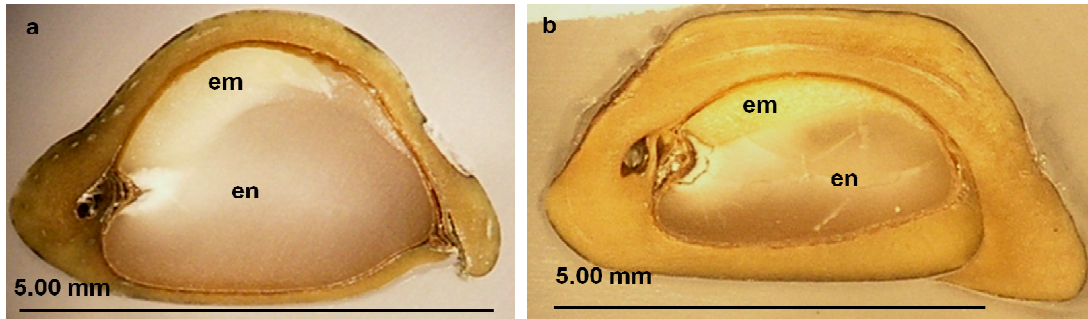


Figura 37. Fotografías tomadas en el estereoscopio: a) muestra 8785 Balsas (*Zea mays* ssp. *parviglumis*); b) muestra 9476 (*Zea diploperennis*). Indicando el endospermo (en) y el germen (em).

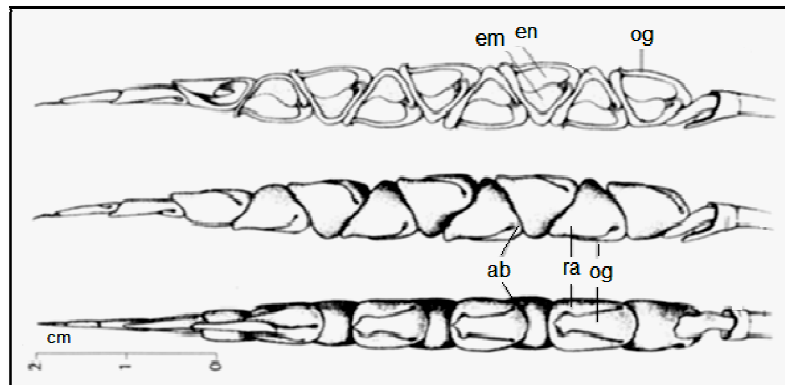


Figura 38. Partes de la mazorca de teocintle: zona de absición (ab), raquis (ra), gluma externa (og), germen o embrión (em) y en dospermo (en) (Iltis 1983; Iltis 2000).

El almidón es el principal componente del grano de maíz (*Zea mays* L.) y por lo tanto influye mucho en la funcionalidad como ingrediente en los diferentes usos de la industria alimentaria. El almidón existe como gránulos discretos con diferentes formas y tamaños, y composición, en función del genotipo del maíz. Las propiedades específicas del almidón en cada genotipo, afectan características como textura, volumen, consistencia, humedad y la vida de anaquel de los alimentos (Raecker y col., 1998; Narvaez y col., 2007b).

Cuadro 11. Propiedades estructurales del grano de teocintle y maíz.

Núm. Id.	Raza/ Conjunto Racial	% endospermo	% cáscara	Diámetro almidón (µm)	Rango almidón (µm)	Diámetro celdas (µm)	Diámetro aleurona (µm)
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>							
9475	<i>Zea perennis</i>	46.49bcd	53.51ab	8.20hi	5 - 11	65.07fgh	21.02ghij
8837	<i>Zea perennis</i>	38.83bcd	61.17ab	7.67i	5 - 11	64.63efgh	35.95a
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>							
10003	<i>Zea diploperennis</i>	34.60cd	65.40a	8.74ghi	6 - 13	61.68fgh	27.63bcdef
9476	<i>Zea diploperennis</i>	29.02d	70.98a	8.52ghi	6 - 11	60.03fgh	27.10bcdefgh
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>							
13451	<i>Zea luxurians</i>	47.97bcd	52.03ab	10.61cdef	6 - 14	90.66bc	19.54ij
9478	Guatemala	30.29cd	69.71a	9.96defgh	7 - 13	67.02efgh	27.44bcdefg
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>							
	<i>Zea</i>						
420532	nicaraguensis	40.26bcd	59.74ab	9.83defgh	6 - 13	84.35bcde	21.76fghij
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>							
9479	Huehuetenango	36.85cd	63.15a	10.75bcde	7 - 15	60.70fgh	25.55defghi
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>							
8785	Balsas	56.77b	43.23b	10.98bcde	7 - 13	88.47bcd	16.76j
9477	Balsas	51.09bcd	48.91ab	11.27bcd	8 - 16	69.51defgh	32.46ab
8762	Balsas	39.32cd	60.68a	12.01abc	8 - 15	66.89efgh	20.65hij
13567	Balsas	43.38bcd	56.62ab	13.67a	8 - 18	89.78bc	25.20defghi
8784	Balsas	43.59bcd	56.41ab	11.17bcde	8 - 15	69.03defgh	30.91abcd
8767	Balsas	48.08bc	51.92ab	11.52bcd	8 - 17	80.21cdef	20.86hij
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>							
13552	Mesa Central	45.75bcd	54.25ab	10.16cdefg	7 - 13	59.60gh	19.25ij
13573	Mesa Central	46.13bcd	53.87ab	7.82i	5 - 10	64.35fgh	21.19fghij
13571	Durango	45.52bcd	54.48ab	10.37cdefg	6 - 14	52.09h	23.70efghi
13566	Nobogame	39.94bcd	60.06ab	8.77fghi	6 - 11	61.51fgh	25.22defghi
8753	Chalco	35.97cd	64.03a	12.00abc	9 - 15	72.31cdefg	25.79cdefghi
13565	Chalco	37.45cd	62.55a	9.34efghi	6 - 12	74.66cdefg	22.53fghij
16795	Chalco	33.76cd	66.24a	7.68i	5 - 11	66.91efgh	32.11abc
8768	Chalco	49.22bcd	50.78ab	10.14cdefg	7 - 14	75.60cdefg	24.68defghi
<b><i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i></b>							
	Chapalote						
861	(SINA2)	89.14a	-	11.31bcd	8 - 14	155.30a	29.55abcde
	Palomero						
1374	(PALOME8)	90.60a	-	12.60ab	7 - 17	104.72b	27.12bcdefgh

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

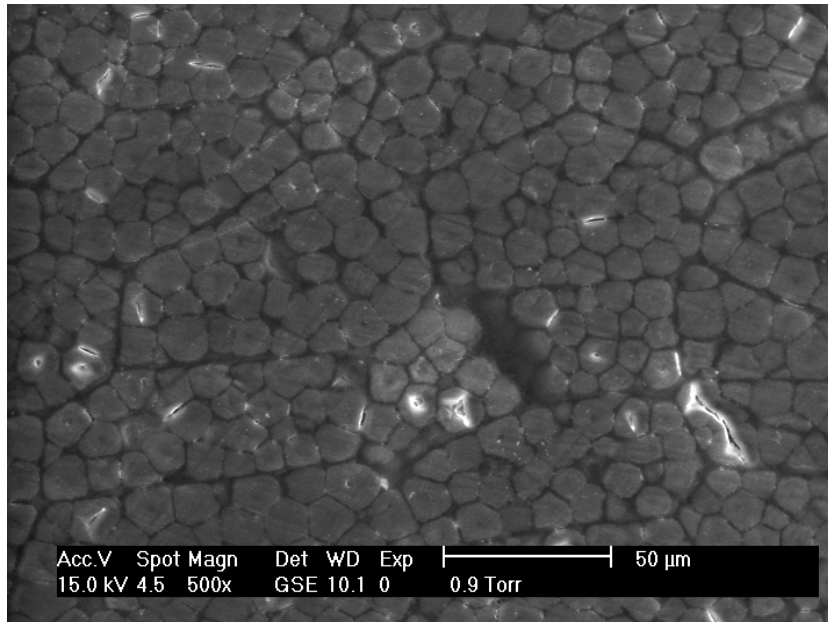


Figura 39. Imagen del tamaño del gránulo de almidón de la muestra 13567 (*Zea mays ssp. parviglumis*), mostrando figuras poliédricas.

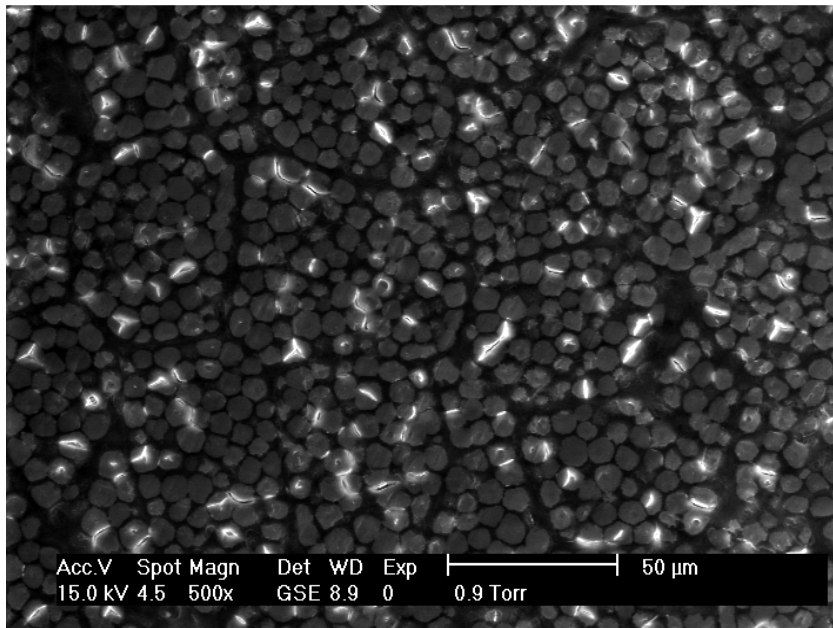


Figura 40. Imagen del tamaño del gránulo de almidón de la muestra 8837 (*Zea perennis*).

Un factor que afecta la distribución del tamaño del gránulo de almidón en el endospermo del grano es el ambiente (Raecker y col., 1998; Narvaez y col., 2007b). El endospermo está formado por una región suave (harinosa) y otra dura (vitrea). Las propiedades fisicoquímicas de los gránulos de almidón en ambos tipos de endospermo, son diferentes. La reactividad (Bertolini y col., 2003), las propiedades físicas (Chiotelli y Le Meste, 2002) y la composición química (Geera y col., 2006) de los gránulos de almidón son afectados por su tamaño, el cual también afecta la funcionalidad del grano y permite una amplia variabilidad de usos (Narvaez y col., 2007b).

Propiedades como temperatura de gelatinización, difracción de rayos X y funcionales del grano de maíz están en relación al tamaño del gránulo de almidón y del contenido de amilosa (MacGregor y Ballance, 1980; Franco y col., 1998; Seetharaman y col., 2001).

Como ya se mencionó, los gránulos de almidón de teocintle son todos cristalinos, con forma poliédrica. También se midió el área y el diámetro, pero por practicidad se darán valores de diámetro en el Cuadro 11; la muestra 13567 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*) presenta un tamaño de gránulo grande con una media de diámetro de 13.67  $\mu\text{m}$  y un área de 116.32  $\mu\text{m}^2$  (Figura 39); y la muestra 8837 (*Zea perennis*) fue la que presentó el tamaño de gránulo más pequeño con una media de diámetro de 7.67  $\mu\text{m}$  y un área de 35.60  $\mu\text{m}^2$  (Figura 40). Además se observan las celdas que contienen al almidón, también tienen forma poliédrica, las cuales son de menor tamaño en comparación con el maíz (Chapalote y palomero). Las diferentes razas del teocintle se encuentran en un rango de medias de diámetro entre 90.66-52.09  $\mu\text{m}$  (área 3915.62-1038.86  $\mu\text{m}^2$ ) y el maíz en 155.30-104.71  $\mu\text{m}$  (área 11734.47-4921.61  $\mu\text{m}^2$ ). Una mayor cantidad de amilosa puede resultar en un aumento de la compresibilidad de los gránulos de almidón en el endospermo duro, lo que conduce a un estado compactado y una forma poligonal (Dombrink y Knutson, 1997).

Tester y col. (2006), reportaron un tamaño de gránulo de almidón del maíz (waxy y normal) con un diámetro entre 2-30  $\mu\text{m}$ , con una forma poliédrica y esférica. Gaytán

y col. (2006), en maíz duro los gránulos de almidón son mayormente poligonales y densamente poblado. Por lo que los granos de teocintle son más pequeños con un rango de 5-18  $\mu\text{m}$  en su máxima longitud.

Holst y col. (2007), reportaron un tamaño de almidón en teocintle además mencionaron que el contenido de almidón es pobre y que hay más lípidos que gránulos de almidón, los cuales se presentan en la Figura 41, la técnica que utilizaron fue que las muestras las cortaron por la mitad y con una navaja le rasparon el interior, montaron en un portaobjetos de microscopio lo raspado y con agua examinaron con luz polarizada y no polarizada con un aumento de 400x. Dentro de sus resultados reportan que los gránulos de almidón en el teocintle Balsas (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) tienen una longitud media entre 8.8-9.5  $\mu\text{m}$  y un rango de longitud máxima de 4-18  $\mu\text{m}$ . Otros teocintles mostraron características similares en tamaño con excepción del *Zea luxurians* que tiene una longitud media de 11.9  $\mu\text{m}$ , es el más largo. Los gránulos individuales con una máxima longitud >18  $\mu\text{m}$  fue observado solo en *Zea diploperennis* y *Zea mays* ssp. *mexicana*. El maíz tiene mucho más alto contenido de almidón que el teocintle, y los gránulos de almidón son grandes, una media con un rango 11.1-15.8  $\mu\text{m}$  y una longitud máxima entre 4-26  $\mu\text{m}$ .

En nuestro estudio, como se mencionó anteriormente, se midió el diámetro de almidón del corte transversal del grano de teocintle; sin embargo al terminar los análisis se realizaron micrografías de dos muestras sobrantes de almidón, en las cuales se observan formas poliédricas del gránulo de almidón, y sin rastro de lípidos. La muestra 9478 (*Zea luxurians*) y la muestra 13565 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*): presentaron una forma del gránulo de almidón poliédrica (Figura 42 y 43), cabe mencionar que se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido de bajo vacío.

Melhus y col. (1953), realizaron un estudio del teocintle *Zea luxurians* originario de Guatemala, en el cual reportan que el teocintle tiene menor cantidad de lípidos y una mayor cantidad de proteínas que el maíz.

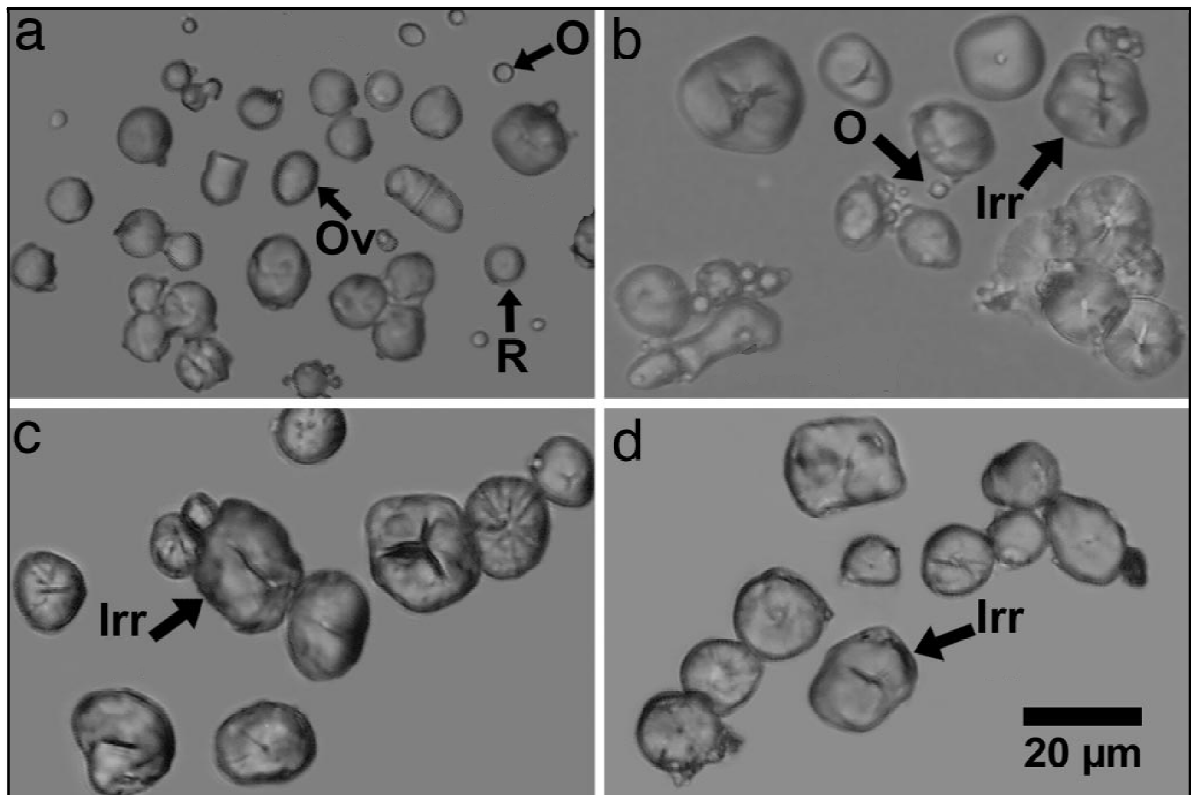


Figura 41. Gránulos de almidón de maíz y teocintle. a) almidón de *Zea mays* ssp. *parviglumis*, la mayoría de los gránulos son de forma ovalada (Ov) a redonda (R), no son irregulares, las esferas pequeñas son lípidos (O); b) granos de almidón de *Zea mays* ssp. *mexicana* (Chalco), tiene una proporción grande de granos como en el maíz, con diferencias, forma irregular (Irr) y mas gotas de lípidos (O); c) almidón de maíz raza Reventador, con forma irregular, ovalada y redonda, observándose fisuras; d) almidón de maíz raza Bolita (Holst y col., 2007).

En el Cuadro 11 se reportan los diámetros del gránulo de almidón de la sección transversal, para la muestra 9478 (*Zea luxurians*) es de 7-13 µm con una media 9.96 µm y en la muestra 13565 (Chalco: *Zea mays* ssp. *mexicana*) de 6-12 µm y una media 9.34 µm. Se observa claramente que algunos gránulos salen del rango previamente reportado en el Cuadro 11, por lo que sería recomendado para futuras investigaciones el medir tamaño de gránulo de almidón, con otras técnicas.

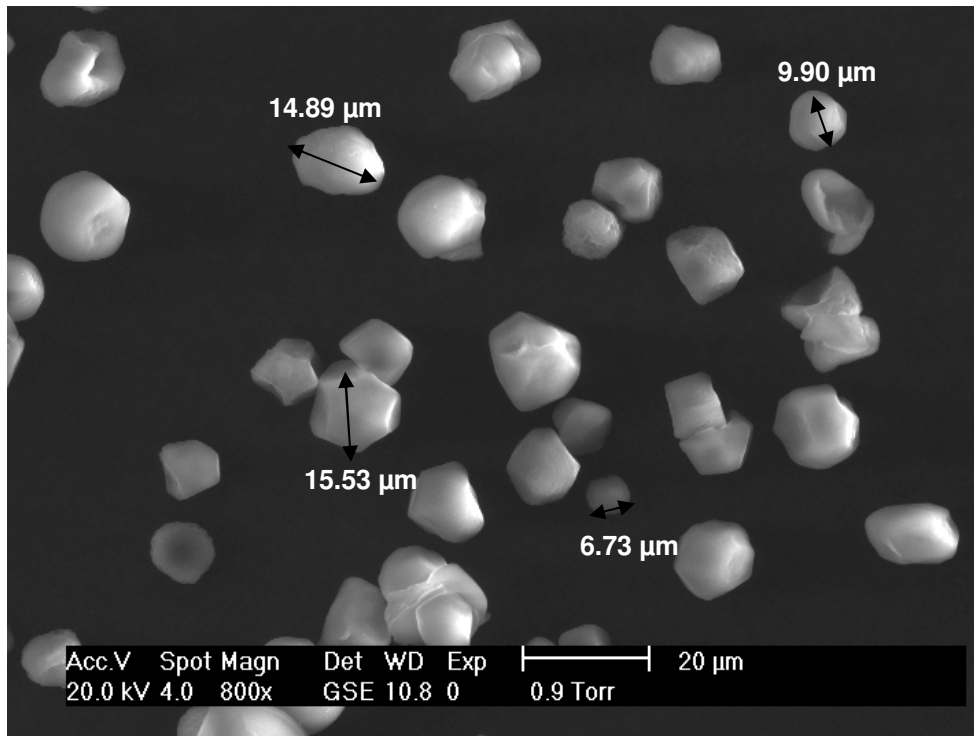


Figura 42. *Zea luxurians* muestra 9478, mostrando algunas mediciones del gránulo de almidón.

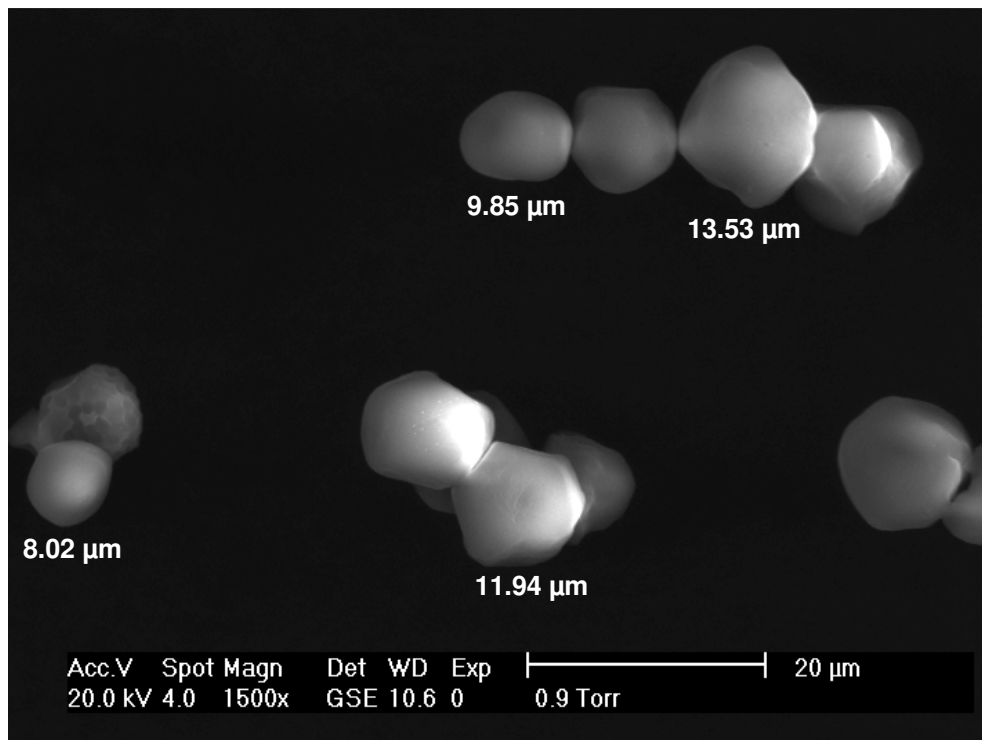


Figura 43. *Zea mays* ssp. *mexicana* muestra 13565.



Narvaéz y col. (2007a), mencionaron que en las razas para palomitas, el tamaño de gránulo de almidón en ambos tipos de endospermo tiende a ser pequeño. De igual manera esto puede relacionarse con la morfología del gránulo de almidón para uso potencial específico. Además de que el uso final del grano estuvo relacionado con su microestructura. Granos con altos grados de compactación, con gránulos de almidón pequeños ( $<12 \mu\text{m}$ ), de forma hexagonal y rodeados de una densa matriz proteica, predominaron en razas aptas para elaborar palomitas de maíz. A medida que el grado de compactación y el grosor del pericarpio ( $75 \mu\text{m}$ ) disminuyeron, aumentó el tamaño de gránulo de almidón y el grano correspondió a razas para elaborar botanas, harinas, tortillas, pozoles y atoles.

Breadle (1939), mencionó que las semillas de teocintle reventaron como las conocidas pop-corn. Estos granos con calentamiento y humedad, el endospermo explota con tal violencia que se separa la cáscara dura que lo protege. Los americanos prehistóricos descubrieron los medios de utilización del teocintle como una planta para la alimentación (Figura 44).



Figura 44. ¿Usaron los Aztecas al teocintle para hacer pop-corn? Semillas de teocintle antes y después del explotado, sugiere que los Americanos usaron al teocintle como alimento Breadle (1939).

En cuanto al tamaño de la aleurona algunas muestras de teocintle rebasan los valores de las medias del maíz (Chapalote y palomero); en general se observa en el Cuadro 11, un rango de longitud de medias entre  $35.95\text{-}16.76 \mu\text{m}$ , la muestra con mayor longitud es 8837 (*Zea perennis*) y la de menor longitud 8785 (*Zea mays* ssp. *parviglumis*) (Figuras 45 y 46).

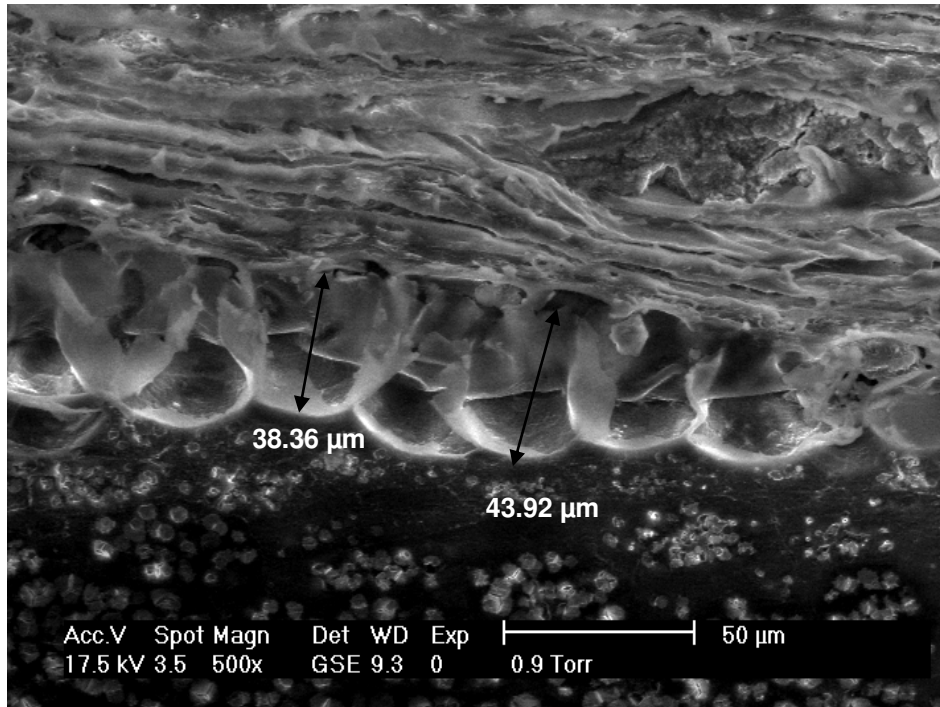


Figura 45. Muestra 8837 (*Zea perennis*).

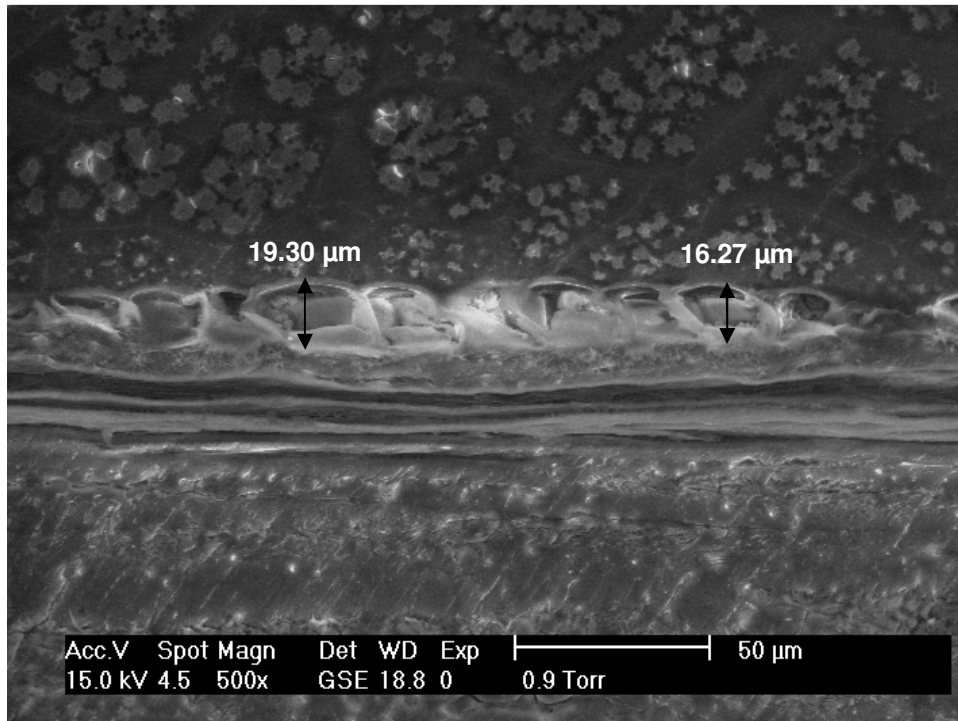


Figura 46. Muestra 8785 (Balsas: *Zea mays ssp. parviglumis*).

Además también se realizó el promedio y se observaron diferencias significativas en cuanto a propiedades de microestructura en el teocintle en comparación con el maíz. Sin embargo en cuanto al diámetro de la aleurona no son diferentes (Cuadro 12).

Cuadro 12. Propiedades estructurales del grano de teocintle y maíz por género.

Género o Grupo Taxonómico	% Endospermo	% Cáscara	Diámetro almidón ( $\mu\text{m}$ )	Área almidón ( $\mu\text{m}^2$ )	Diámetro Celdas ( $\mu\text{m}$ )	Área celda ( $\mu\text{m}^2$ )	Diámetro Aleurona ( $\mu\text{m}$ )
<i>Zea perennis</i>	42.66bc	57.34ab	7.93d	37.88e	64.89c	2010.75bc	28.48a
<i>Zea diploperennis</i>	31.81c	68.19a	8.63cd	43.02de	60.88c	1637.03c	27.37a
<i>Zea luxurians</i>	39.13bc	60.87ab	10.29b	62.22c	78.84b	3083.86b	23.49a
<i>Zea nicaraguensis</i>	40.26bc	59.74ab	9.83bc	49.57cde	84.35b	2934.56bc	21.76a
<i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i>	36.85bc	63.15ab	10.75ab	67.51bc	60.70c	192501bc	25.56a
<i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i>	47.45b	52.55b	11.77a	83.72ab	76.81b	2821.18b	24.47a
<i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i>	41.65bc	58.35ab	9.54bc	54.78cd	64.71c	1921.27c	24.31a
<i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i>	89.87a	---	11.96a	88.77a	126.39a	7841.40a	28.34a

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

#### VI. 4 Grado de cristalinidad por difracción de rayos X.

Los almidones presentan estructuras cristalinas y no-cristalinas; la relación entre estas estructuras es el principal factor que determina las propiedades del almidón. Esas estructuras dan como resultado un patrón típico de difracción de rayos X, dependiendo del tipo de almidón. Se ha demostrado que los almidones de cereales muestran un patrón de difracción tipo A, los de tubérculos un patrón tipo B, algunos tubérculos y granos un patrón tipo C y los complejos de amilosa helicoidal el V (Figura 47). También se ha encontrado que los almidones generan un variado número de patrones de difracción después de haber sufrido una modificación física o química. También en la Figura 47, el difractograma para maíz crudo muestra los picos de difracción correspondientes al almidón tipo A, a espaciamientos interplanares de 5.8, 5.1 y 3.8 Å. El tipo V es típicamente mostrado por la fracción de amilosa como un resultado de formación de complejos. Para la forma hidratada. Los picos aparecen a 12, 6.8 y 4.4 Å, la línea a 4.4 Å seguido aparece como una primera indicación de que los complejos son formados. Los agentes complejantes

incluyen alcoholes alifáticos y ácidos grasos, ciertos surfactantes (emulsificantes) y yodo. La forma deshidratada muestra reducidos espacios de 11.3, 6.5 y 4.3 Å, algunos almidones nativos muestran mezclas A+V, B+V y C+V. para los almidones de maíz, trigo y arroz naturalmente ocurren complejos de ácidos grasos o fosfolípidos con una fracción de amilosa (Zobel, 1988).

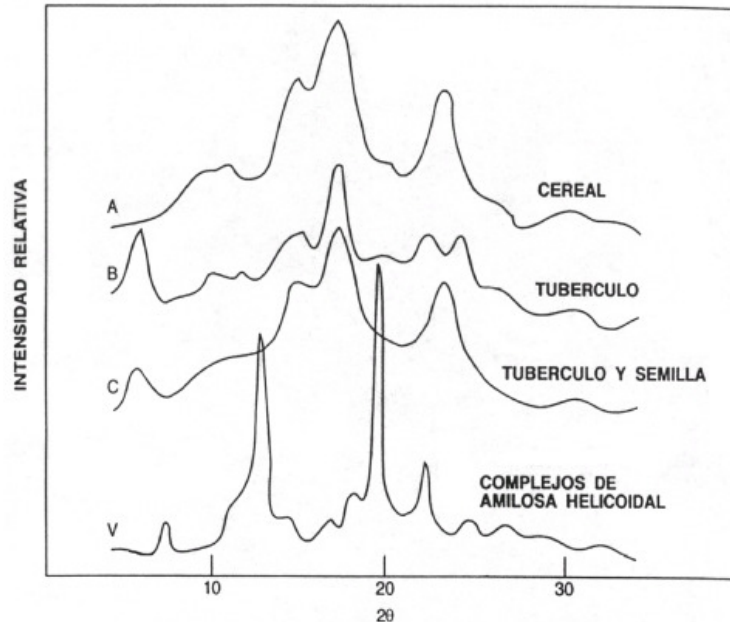


Figura 47. Patrones de difracción de rayos X, para diferentes almidones (Zobel, 1988).

Los granos de teocintle siguen un patrón de difracción tipo A, el cuál es típico de los cereales. En el Cuadro 13 se muestran el porcentaje de cristalinidad calculado con el programa Jade 5.0 (Material Data Inc. 1994), además en el Cuadro 14 se muestran los espaciamientos interplanares. Se observa que de acuerdo a Zobel (1988), los granos de teocintle presentan los picos a espaciamientos interplanares de 5.8, 5.1 (doble) y 3.8 Å, los cuales corresponden al 1er, 2do, 3er y 5to pico con ángulo de  $2\theta$  de 17.8, 19.9-20.7 y 26.6° respectivamente, cabe resaltar que se incluye el patrón de amilopectina de maíz grado reactivo (Sigma Aldrich) los cuales corresponden a los del patrón A (Figura 48).

Cuadro 13. Porcentaje de cristalinidad del teocintle con la referencia del maíz.

Número Id.	Raza/ Conjunto Racial	Cristalinidad (%)
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsd.</b>		
9475	<i>Zea perennis</i>	10.59
8837	<i>Zea perennis</i>	1.39
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>		
10003	<i>Zea diploperennis</i>	4.81
9476	<i>Zea diploperennis</i>	3.26
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>		
13451	<i>Zea luxurians</i>	5.78
9478	Guatemala	7.35
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>		
420532	<i>Zea nicaraguensis</i>	9.76
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>		
9479	Huehuetenango	3.4
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>		
8785	Balsas	9.12
9477	Balsas	8.73
8762	Balsas	1.32
13567	Balsas	12.65
8784	Balsas	3.45
8767	Balsas	5.11
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>		
13552	Mesa Central	7.02
13573	Mesa Central	5.64
13571	Durango	8.67
13566	Nobogame	12.43
8753	Chalco	15.51
13565	Chalco	8.87
16795	Chalco	9.53
8768	Chalco	7.49
<b><i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i></b>		
861	Chapalote (SINA2)	14.43
1374	Palomero (PALOME8)	8.5
<b>Amilopectina grado reactivo</b>		27.06

Además se observa un patrón tipo A-V con espaciamiento interplanar de 4.4 Å, con ángulo de  $2\theta$  de  $23.5^\circ$  el cual corresponde al 4to pico (Figura 49). Esta línea aparece como una primera indicación de que los complejos son formados, es este caso el complejo amilosa-lípido (Zobel, 1988; Perera y col., 2001).

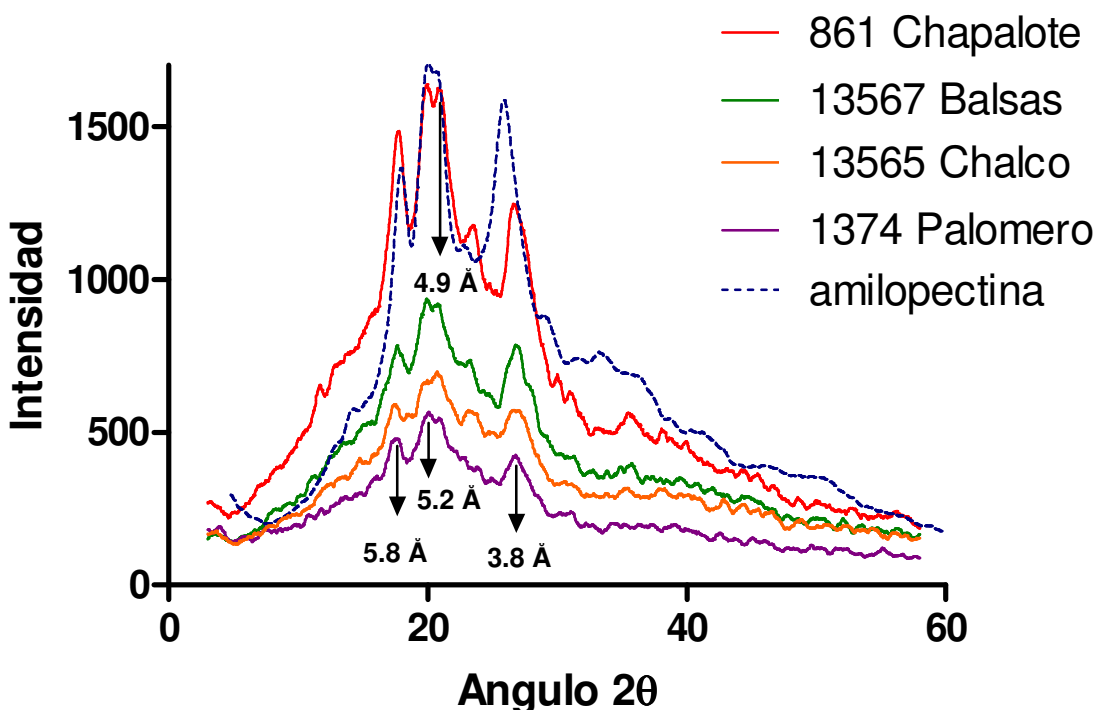


Figura 48. Patrones de difracción de rayos X de teocintle, maíz y amilopectina; se observan los picos con ángulo de  $2\theta$  de  $17.8^\circ$ ,  $19.9^\circ$ ,  $20.7^\circ$  y  $26.6^\circ$ .

En general si se mostraran todos los difractogramas del teocintle comparándolos con el maíz Chapalote, se observaría que todos están por debajo de éste, por lo que se propone una menor cristalinidad; pero sin embargo la intensidad de los picos del maíz palomero también es menor, se encuentran dentro del almidón de teocintle. La intensidad y resolución de los picos en un difractograma decrece cuando disminuye el diámetro en el gránulo de almidón, esto sugiere un decremento en la cristalinidad (gránulos con diámetro  $<15 \mu\text{m}$ , gránulos con diámetro  $\geq 15 \mu\text{m}$ ) (Franco y col., 1998). De acuerdo con estos resultados, se

observa que muchas veces no se puede comparar la amilopectina con los almidones aislados, ya que un es grado reactivo es decir es amilopectina pura aislada de almidón de maíz y los almidones de teocintle pudieran ir con residuos de lípidos o proteínas los cuales están interactuando con el almidón, sin embargo si se observan lo picos característicos.

En la Figura 49 se muestra el patrón tipo A-V con espaciamiento interplanar de 4.4 Å, con ángulo de  $2\theta$  de  $23.5^\circ$  (complejo amilosa-lípido) en muestras de teocintle.

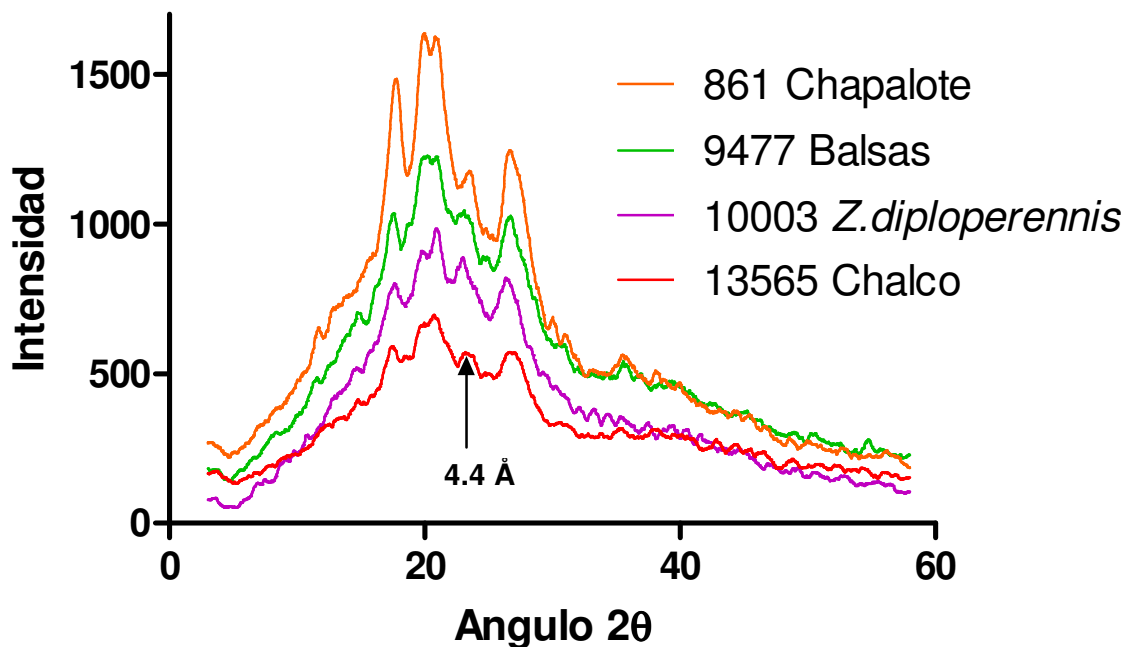


Figura 49. Patrones de difracción de rayos X, la muestra de teocintle 10003 (*Zea diploperennis*) es en el que se observa la mayor intensidad del pico con ángulo de  $2\theta$  de  $23.5^\circ$  correspondiente al complejo amilosa-lípido.

Rojas y col. 2007, mencionaron que por inspección directa el endospermo duro del maíz puede estar formado mayormente por amilopectina, ya que muestran un difractograma con almidón suave, esta no muestra picos localizados a  $15.214$  ( $d =$

5.8191 Å), 21.154 ( $d = 3.8382$  Å) en la escala de  $2\theta$ , que son características para la identificación de presencia de amilopectina.

Cuadro 14. Localización de los picos en el plano cristalino de los diferentes tipos de almidón de teocintle y de maíz de acuerdo a la medición de rayos X.

Núm. Id.	Raza/ Conjunto Racial	1er pico		2o pico		3er pico		4to pico		5to pico	
		$2\theta$	Å	$2\theta$	Å	$2\theta$	Å	$2\theta$	Å	$2\theta$	Å
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsd.</b>											
9475	<i>Zea perennis</i>	17.6	5.85	19.8	5.20	21.1	4.89	22.8	4.53	26.8	3.86
8837	<i>Zea perennis</i>	17.4	5.91	19.1	5.39	20.7	4.98	22	4.69	--	--
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>											
10003	<i>Zea diploperennis</i>	17.6	5.85	19.7	5.23	20.9	4.93	23	4.49	26.3	3.93
9476	<i>Zea diploperennis</i>	17.4	5.91	19.3	5.34	20.8	4.96	23.8	4.34	26.4	3.92
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>											
13451	<i>Zea luxurians</i>	17.2	5.98	20.3	5.08	20.9	4.93	22.3	4.63	26.6	3.89
9478	Guatemala	17.4	5.91	19.9	5.18	21.1	4.89	22.7	4.55	26.9	3.85
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>											
420532	<i>Zea nicaraguensis</i>	17.3	5.95	19.6	5.26	20.8	4.96	22.6	4.57	26.9	3.85
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>											
9479	Huehuetenango	17.1	6.02	--	--	20.8	4.96	24.2	4.27	26.7	3.87
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>											
8785	Balsas	17.5	5.88	19.8	5.20	20.8	4.96	22.9	4.51	26.7	3.87
9477	Balsas	17.5	5.88	20	5.15	21	4.91	23.1	4.47	26.7	3.87
8762	Balsas	17.6	5.85	19.6	5.26	20.7	4.98	23.2	4.45	26.2	3.95
13567	Balsas	17.6	5.85	19.9	5.18	20.8	4.96	23.2	4.45	26.7	3.87
8784	Balsas	17.3	5.95	20.8	4.96	21.8	4.73	23.2	4.45	26.5	3.90
8767	Balsas	17.5	5.88	19.7	5.23	20.8	4.96	27.7	3.74	26.8	3.86
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>											
13552	Mesa Central	17.5	5.88	20.2	5.10	20.7	4.98	22.7	4.55	26.3	3.93
13573	Mesa Central	17.1	6.02	19.7	5.23	20.9	4.93	23.4	4.41	26.8	3.86
13571	Durango	17.5	5.88	19.9	5.18	21	4.91	22.8	4.53	26.7	3.87
13566	Nobogame	17.5	5.88	20.6	5.00	--	--	23.5	4.39	26.5	3.90
8753	Chalco	17.4	5.91	--	--	20.7	4.98	22.6	4.57	26.7	3.87
13565	Chalco	17.5	5.88	19.9	5.18	20.7	4.98	23.2	4.45	26.6	3.89
16795	Chalco	17.5	5.88	20.2	5.10	--	--	23.2	4.45	26.3	3.93
8768	Chalco	17.5	5.88	19.9	5.18	20.7	4.98	23	4.49	26.9	3.85
<b><i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i></b>											
861	Chapalote (SINA2)	17.8	5.78	19.9	5.18	20.7	4.98	23.5	4.39	26.6	3.89
1374	Palomero (PALOME8)	17.5	5.88	20	5.15	20.9	4.93	23.7	4.36	26.7	3.87



Por lo que además de observar el almidón en micrográficas, es importante medir su cristalinidad para conocer más acerca de su composición. Pérez y Bertoft (2010), aluden que existe una correlación directa entre el contenido de amilosa y algunas características morfológicas. Menos intensidad del pico amilosa-lípido, menor es la temperatura de inicio para sus propiedades térmicas (Lui y col., 2010).

Cabe resaltar que en el Cuadro 13, en donde se muestra el porcentaje de cristalinidad hay cinco muestra que muestran muy poca cristalinidad por lo que se considerarían como amorfas; pero esto se justifica debido a que en general para este análisis se obtuvo muy poca muestra de la extracción del almidón ( $\approx 25$  mg) y en algunos otros fue menor (es recomendable  $\approx 1$  g, de acuerdo al técnico encargado del equipo). En el caso de la muestra 8837 (*Zea perennis*) y 8762 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*) se obtienen las menores cristalinidades, seguido de las muestras 9476 (*Zea diploperennis*), 9479 (*Zea mays* ssp. *huehuetenangensis*) y 8784 (Balsas: *Zea mays* ssp. *parviglumis*). Según con Perera y col. (2001), mencionaron que baja intensidad de picos sugieren que tienen un almidón con baja cristalinidad.

Los gránulos de endospermo de maíz suave, presumiblemente menos maduro que los del endospermo duro, tienen un bajo contenido de amilosa ( $20.5 \pm 1.9\%$  vs.  $23.0 \pm 1.0\%$ ), exhiben más poros en la superficie y son más susceptibles al haz de electrones de un microscopio, comparado con gránulos del endospermo duro (Dombrink y Knutson, 1997).

#### VI. 5 Propiedades térmicas.

El DSC (Calorímetro Diferencial de Barrido) ha sido usado en el estudio para las propiedades térmicas asociadas con la gelatinización del almidón. La gelatinización es el proceso por el cual la estructura interna del gránulo se rompe y libera el polisacárido en el medio que lo rodea (Singh y col., 2004). El proceso de gelatinización implica una serie de etapas de expansión de gránulos progresivamente cuando se calienta en exceso en el agua, la morfología de los cuales varían entre diferentes tipos de almidones, donde los gránulos (i) hidratan en

forma progresiva, (ii) los dobles hélices se deshacen, como los enlaces de hidrógeno se rompen, (iii) regiones cristalinas se convierten en regiones amorfas como consecuencia de (ii), (iv) gránulos absorben agua y se hinchan y (v) en última instancia, los gránulos se hinchan tanto que forma granular se pierde y tienden a la gelación y/o solubilización (Tester y col., 2006). De manera práctica se ha estudiado la temperatura de inicio, pico y final, así como el arreglo de éstas para explicar el fenómeno de gelatinización.

El resultado de los parámetros del DSC como Temperaturas de transición (Temperatura de inicio ( $T_i$ ) °C, Temperatura pico ( $T_p$ ) °C y Temperatura final de gelatinización ( $T_f$ ) °C) y la entalpia de gelatinización ( $\Delta H$ ) de los diferentes almidones de las razas de teocintle son resumidos en el Cuadro 15. La entalpia ( $\Delta H$ ) de los almidones de teocintle presenta una media con un rango de 3.05 a 9.88 J/g y del maíz (palomero y Chapalote) 11.03 y 10.65 J/g respectivamente. Los valores de entalpia de gelatinización de almidón han sido reportado que son afectados por factores como la forma del gránulo, porcentaje de grandes y pequeños gránulos y la presencia de esteres de fosfato; además menciona que la baja entalpia del almidón de maíz baby puede ser atribuida al tamaño de gránulo que es más pequeño (diámetro de 6.33 $\mu$ m) y al bajo contenido de amilosa (Singh y col., 2004). Como se menciona anteriormente la entalpia se ve afectada por porcentaje de pequeños y grandes gránulos de almidón (Singh y col., 2004), en el teocintle se observó que la muestra 8762 (Balsas) presenta un  $\Delta T$  de 16.36 el cual es el rango más alto por lo que se interpreta que cuenta con gránulos de almidón grandes y pequeños, la muestra 8768 (Chalco) presenta un  $\Delta T$  menor de 8.06 (Cuadro 15).  $T_i$ ,  $T_p$  y  $T_f$  de los almidones de los diferentes tipos de teocintle van en un rango de 60.88-67.27, 65.63-71.48 y 70.82-77.48 °C respectivamente. El teocintle de la muestra 13451 (*Zea luxurians*) de Nicaragua muestra la más alta temperatura de gelatinización ( $T_i = 67.11$  °C), mientras que la muestra 10003 (*Zea diploperennis*) muestra la más baja temperatura de inicio (60.88 °C); para el maíz Chapalote  $T_i$  de 67.27 °C,  $T_p$  de 71.76 °C y  $T_f$  de 76.78 °C; maíz palomero  $T_i$  de 63.92 °C,  $T_p$  de 68.05 °C y  $T_f$  de 73.33 °C (Figura 50).

Cuadro15. Propiedades térmicas del almidón de teocintle.

Núm. Id.	Raza/ Complejo Racial	Temperatura inicio (°C)	Temperatura pico (°C)	Temperatura final (°C)	Δ T	Entalpia (J/g)
<b><i>Zea perennis</i> (Hitch.) Reeves y Mangelsdorf</b>						
9475	Zea perennis	62.76bcdef	67.13efgh	71.80fgh	9.04ghi	4.10ghij
8837	Zea perennis	61.65bcdef	67.78bcdefgh	73.66bcdefgh	12.01cdef	3.05ij
<b><i>Zea diploperennis</i> Iltis, Doebley y Guzman</b>						
10003	Zea diploperennis	60.875f	66.21gh	71.94fgh	11.07cdefg	3.17j
9476	Zea diploperennis	61.14ef	66.47fgh	72.42efgh	11.29cdef	3.87hij
<b><i>Zea luxurians</i> (Durieu y Asch.) Bird</b>						
13451	Zea luxurians	67.11a	71.48a	77.48a	10.37efgh	4.43ghij
9478	Guatemala	63.48bcde	68.90bcde	75.79abcd	12.31cde	6.38cdefgh
<b><i>Zea nicaraguensis</i> Iltis y Benz</b>						
420532	Zea nicaraguensis	64.16bc	70.30ab	76.39abc	12.23cde	5.96cdefghi
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i> (Iltis y Doebley) Doebley</b>						
9479	Huehuetenango	64.34b	69.88abc	75.07abcde	10.73defg	4.28ghij
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i> Iltis y Doebley</b>						
8785	Balsas	62.44bcdef	68.35bcdefg	73.76cdefgh	11.33cdef	8.35bcd
9477	Balsas	61.54def	67.95cdefg	73.91bcdefg	12.38cde	5.95cdefghi
8762	Balsas	61.07ef	69.99abc	77.43a	16.35a	3.99hij
13567	Balsas	63.17bcdef	69.64abcd	76.32abc	13.16c	7.09cdef
8784	Balsas	60.99def	67.65bcdefgh	74.43bcdefgh	13.44bc	4.99efghij
8767	Balsas	61.72cdef	70.20abc	77.42a	15.70ab	4.975fghij
<b><i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i> (Schrad.) Iltis</b>						
13552	Mesa Central	61.26ef	67.53defgh	74.05bcdefg	12.79cd	6.06cdefghi
13573	Mesa Central	62.96bcdef	66.90efgh	71.44gh	8.48hi	5.79defghij
13571	Durango	62.86bcdef	67.22efgh	72.36efgh	9.51fghi	6.75cdefg
13566	Nobogame	62.86bcdef	66.89efgh	71.37gh	8.52hi	4.715fghij
8753	Chalco	61.99bcdef	67.06efgh	73.17defgh	11.19cdefg	9.86ab
13565	Chalco	64.20bc	68.73bcdef	74.62abcdef	10.43efgh	8.17bcde
16795	Chalco	62.42bcdef	65.63h	70.82h	8.41hi	9.88ab
8768	Chalco	63.92bcd	67.46defgh	71.98fgh	8.06i	8.46abc
<b><i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i></b>						
861	Chapalote (SINA2)	67.27a	71.76a	76.78ab	9.51fghi	10.65ab
1374	Palomero (PALOME8)	63.92bcd	68.05bcdefg	73.33defgh	9.41fghi	11.03a

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

Perera y col. (2001) reportaron valores de  $T_i$  para almidón de maíz normal de 64.4 °C,  $T_p$  de 69.4 °C,  $T_f$  de 80.4 °C y  $\Delta H$  13.2 J/g. Borrás y col. (2006), reportan que el almidón de maíz ordinario tiene una temperatura de gelatinización ( $T_i$ ) de 66.9 °C y una entalpía de gelatinización de 9.1 J/g, y siete muestras de maíz palomero con una temperatura de gelatinización en un rango de 64.5–67.8 °C y una entalpía de gelatinización entre 8.4-10.3 J/g, los cuales son valores similares a los encontrados en las raza *Zea mays* L. ssp. *mays* (Chapalote y palomero).

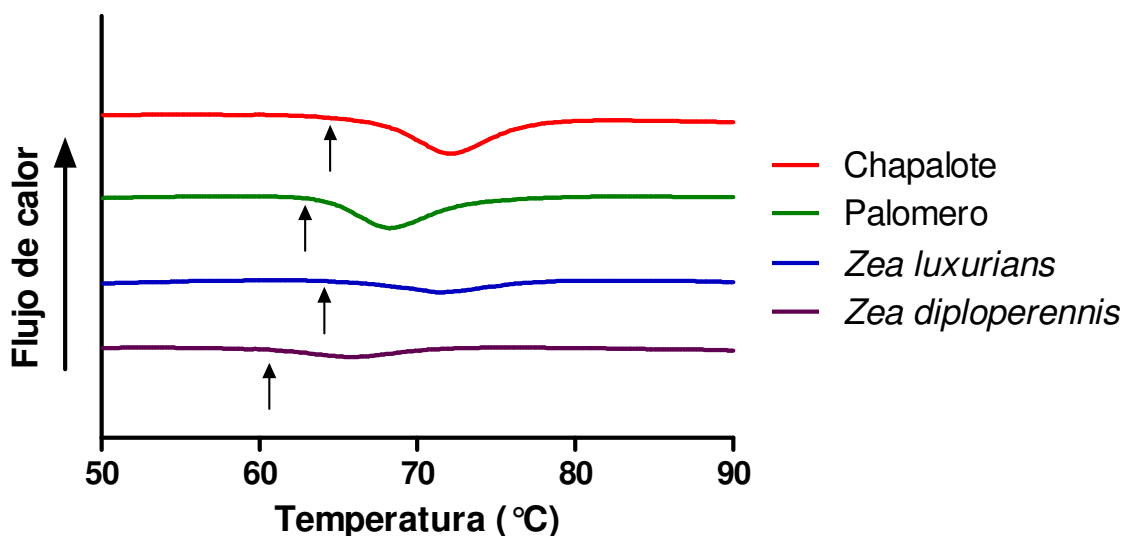


Figura 50. Comportamiento térmico: el teocintle *Zea luxurians* (13451)  $T_i$  de 67.11 °C y *Zea diploperennis* (10003)  $T_i$  de 60.88 °C; para el maíz Chapalote  $T_i$  de 67.27 °C y el maíz palomero  $T_i$  de 63.92 °C.

Qi y col. (2004), indican que la temperatura de gelatinización representa la facilidad con la cual el agua puede penetrar los gránulos e hidratarlos, plastificando las zonas amorfas lo cual es un evento que precede a la gelatinización como tal, si los enlaces dobles no se ordenan, se podrían esperar eventos de "gelatinización" a una relativamente baja temperatura. Sin embargo, cuando dobles enlaces se empaquetan en dominios cristalinos con el orden más o menos perfecto, las variaciones en la tasa de hidratación se crearan con las estructuras más ordenada restringiendo la hidratación de las regiones más o menos ordenadas y por lo tanto,

requieren temperaturas más elevadas para facilitar la hidratación con asociados aumento de las temperaturas de gelatinización.

Liu y col. (2010), mencionan que a diferencia del almidón normal, el almidón de maíz rico en amilosa mostró un rango estrecho de gelatinización medida por DSC después de la hidroxipropilación, lo que puede explicarse por la destrucción del complejo amilosa-lípido.

En la Figura 51 se muestran los termogramas del teocintle acomodados por complejo racial, nótese el aumento de la temperatura de inicio de la gelatinización de los teocintles, el maíz Chapalote fue el que tubo la mayor Ti.

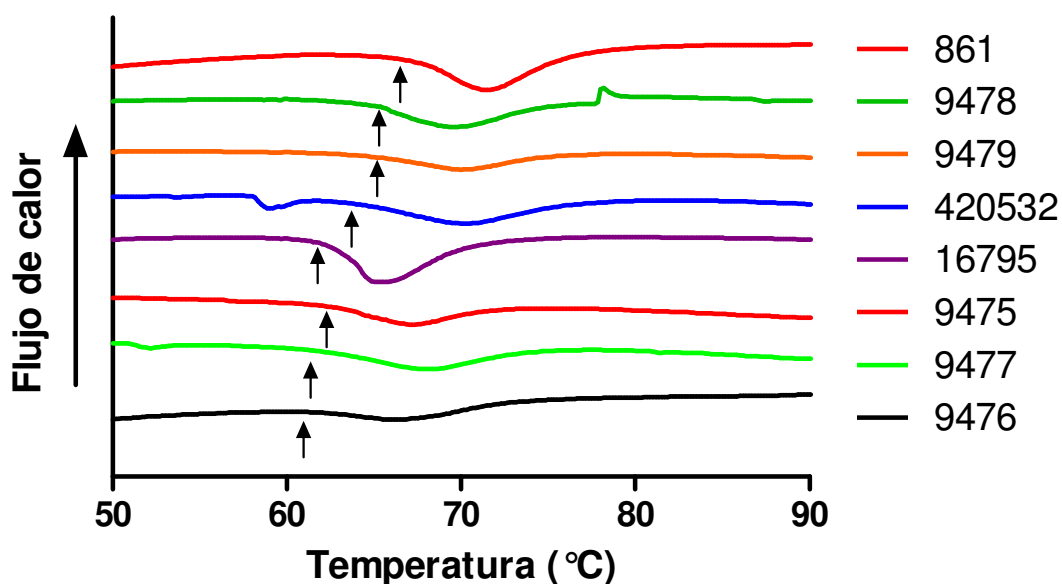


Figura 51. Comportamiento térmico de las diferentes razas acomodados por la temperatura de inicio de gelatinización: 861-*Zea mays* L. ssp. *mays*, 9478-*Zea luxurians*, 9479-*Zea mays* ssp. *huehuetenangensis*, 420532-*Zea nicaraguensis*, 16795-*Zea mays* ssp. *mexicana*, 9475-*Zea perennis*, 9477-*Zea mays* ssp. *parviglumis* y 9476-*Zea diploperenis*.

Tang y col. (2000), en un estudio con almidón de cebada, mencionan que la entalpia tiende a decrecer en el orden de grande (12–19  $\mu\text{m}$ ), mediano (10  $\mu\text{m}$ ) y pequeño (2  $\mu\text{m}$ ) gránulos en las mismas fracciones.

Utrilla y col. (2010) en un estudio en almidón de maíz blanco y azul, concluyen que no hay diferencias en el promedio de la temperatura de gelatinización en gránulos pequeños y grandes. La entalpia de gelatinización fue alta en gránulos pequeños que en gránulos grandes, indicando diferencias estructurales entre ambas poblaciones.

El Cuadro 16 muestra los valores resumidos de propiedades térmicas del almidón de teocintle por género, de manera similar se muestran las mismas tendencias antes mencionadas del cuadro 15; el *Zea diploperennis* muestra la más baja  $T_i$  y el *Zea luxurians* junto con el *Zea mays* L. ssp. *mays* la más alta  $T_i$ , por lo que está influyendo el tamaño de gránulo de almidón, de igual manera el  $\Delta T$  con valor más alto corresponde al *Zea mays* ssp. *parviglumis* (Balsas) de 13.75 y el valor más bajo lo presentan *Zea perennis*, *Zea mays* ssp. *mexicana* (Chalco) y *Zea mays* L. ssp. *mays*.

Cuadro 16. Propiedades térmicas del almidón de teocintle por género.

Género o Grupo Taxonómico	Temperatura inicio (°C)	Temperatura pico (°C)	Temperatura final (°C)	$\Delta T$	Entalpia (J/g)
<i>Zea perennis</i>	62.39bc	67.35bcd	72.42bc	10.03b	3.75c
<i>Zea diploperennis</i>	61.01c	66.34d	72.18c	11.18ab	3.52c
<i>Zea luxurians</i>	65.29a	70.19a	76.63a	11.34ab	5.40bc
<i>Zea nicaraguensis</i>	64.16abc	70.30ab	76.39ab	12.23ab	5.96bc
<i>Zea mays</i> ssp. <i>huehuetenangensis</i>	64.34ab	69.89abc	75.07abc	10.73ab	4.28bc
<i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i>	61.89bc	69.81ab	75.64a	13.75a	5.97bc
<i>Zea mays</i> ssp. <i>mexicana</i>	62.80bc	67.18cd	72.48c	9.67b	7.46b
<i>Zea mays</i> L. ssp. <i>mays</i>	65.60a	69.91ab	75.06abc	9.46b	10.84a

Letras iguales en la misma columna no presenta diferencias significativas a una  $P \leq 0.05$ .

## VI. 6 Dendograma.

Se realizó un análisis de conglomerados (cluster) con el fin de que las razas se agrupen de acuerdo al género al cual corresponden, con los promedios donde se involucraron propiedades físicas del grano (largo, alto y ancho); térmicas (temperatura de inicio ( $T_i$ ), temperatura pico ( $T_p$ ), temperatura final de gelatinización ( $T_f$ ) y la entalpia de gelatinización ( $\Delta H$ )) y propiedades de

microestructura (% de cáscara, % de endospermo, diámetro de almidón, diámetro de celdas y longitud de la aleurona); como los agrupamientos que realizan los genetistas.

De acuerdo a la Figura 52, se presentan 23 clusters, si se agrupan en cuatro el maíz Chapalote y palomero se agruparían en un cluster y serían diferentes a todos los teocintles, pero a la vez los agrupan.

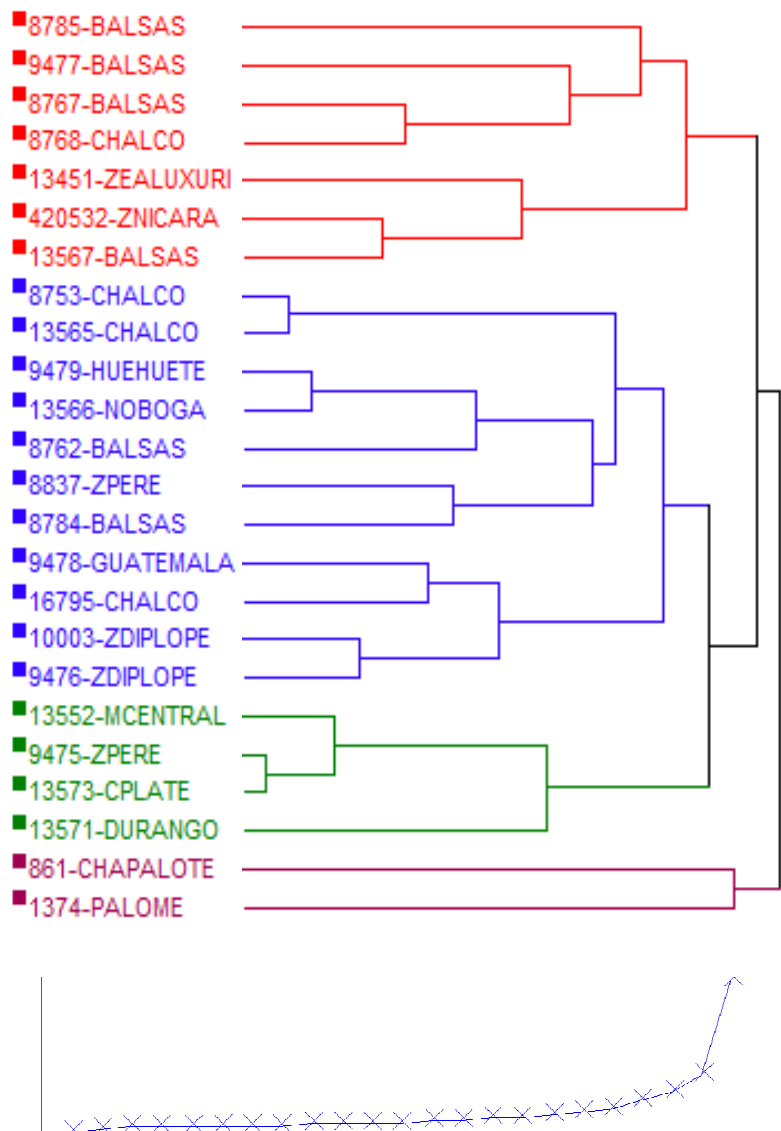


Figura 52. Dendrograma de los promedios del teocintle y maíz con el método de varianza mínima (Ward), indicando cuatro clusters.

## VII. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas, mecánicas y viscoelásticas, indican que es un factor importante el cual se ve afectado en la molienda.

En lo referente a la microestructura el gránulo de almidón muestra formas poliédricas y una forma compacta, por lo que el endospermo está compuesto de almidón duro.

Los estudios de rayos-X mostraron que el teocintle sigue un patrón tipo A, pero con una menor intensidad en sus picos, alude que tienen menor cantidad de amilopectina, es decir el teocintle tiende a formar un patrón tipo A-V con espaciamiento interplanar de  $4.4 \text{ \AA}$  ( $2\theta = 23.5^\circ$ ) (complejo amilosa-lípido). La intensidad baja de los picos del almidón de teocintle también sugiere que se debe a la disminución del tamaño del gránulo de almidón, esto se comprueba con las propiedades térmicas.

De acuerdo a las propiedades térmicas el teocintle muestra temperaturas de gelatinización más bajas en comparación con el almidón de maíz, por lo que sugiere que está involucrado el tamaño de gránulo de almidón, es decir gránulos pequeños presentan menor temperatura de gelatinización y viceversa; también por la cantidad de amilosa presente.

Los gránulos de almidón tienen diferentes propiedades de gelatinización y reológicas, indicando que tienen distintas aplicaciones en industrias alimentarias y no alimentarias; pero se tienen que indagar más en la investigación para darle un uso en específico.



## VIII. BIBLIOGRAFÍA

**Allen, R. D. y Arnott, H. J. 1981.** Effects of Exogenous enzymes on oilseed protein bodies. *Scanning Electron Microscopy*. 561-570.

**Allen, R. D. y Arnott, H. J. 1982.** Protein bodies in dormant, imbibed and germinated sunflower cotyledons. *Food Microstructure*. 1: 63-73.

**Antoine, C., Peyron, S., Mabille, F., Lapierre, C., Bouchet, B., Abecassis, J., y Rouau, X. 2003.** Individual contribution of grain outer layers and their cell wall structure to the mechanical properties of wheat bran. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51: 2026-2033.

**Atwell, W. A., Hood, L. F., Lineback, D. R., Viarriano, M. E. y Zobel, H. F. 1988.** The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*. 33: 306-311.

**Baker, A. A., Miles, M. J. y Helbert, W. 2001.** Internal structure of the starch granule revealed by AFM. *Carbohydrate Research*. 330(2): 249-256.

**Beadle, G. W. 1939.** Teosinte and the origin of maize. *Journal Heredity* 30: 245-247.

**Beadle, G. W. 1972.** The mystery of maize. *Field Museum of Natural History Bulletin*. 43: 2-11.

**Beadle, G. W. 1977.** *Origins of agriculture: The origin of Zea mays*. Edited by Reed, C. A. Mouton Publishers, The Hague, Netherlands: 615-635.

**Beadle, G. W. 1978.** *Maize breeding and genetics: Teosinte and the origin of maize*. Edited by Walden, D. B. John Wiley and Sons, New York, USA: 113-128.

**Beadle, G. W. 1980.** The ancestry of corn. *Scientific American*. 242(1): 112-119.

**Betchel, D. B. 1983.** *New frontiers in food microstructure: From the farm to the table- A transmission electron microscope account of cereal structure and its relationship to end-use properties*. Edited by Betchel, D. B. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota: 269-285.

**Bennetzen, J., Buckler, E., Chandler, V., Doebley, J. F., Dorweiler, J., Gaut, B., Freeling, M., Hake, S., Kellogg, E., Poethig, R. C., Walbot, V. y Wessler, S. 2001.** Genetic evidence and the origin of maize. *Latin American Antiquity* 12(1): 84-86.

**Benz, B. F. 2001.** Archaeological evidence of teosinte domestication from Guilá Naquitz, Oaxaca. *Proceedings National Academy Sciences USA*. 98(4): 2104-2106.

**Benz, B. F. y Iltis, H. H. 1990.** Studies in archaeological maize I: The “wild” maize from San Marcos Cave reexamined. *American Antiquity*. 55(3): 500-511.

**Bertolini, A. C., Souza, E., Nelson, J. E. y Huber, K. C. 2003.** Composition and reactivity of A- and B-type starch granules of normal, partial waxy, and waxy wheat. *Cereal Chemistry*. 80(5): 544–549.

**Biliaderis, C. G. 1998.** Polysaccharide association structures in foods: Structures and phase transitions of starch polymers. Edited by Walter, R. H. Marcel Dekker, Inc., New York: 57-168.

**Borras, F., Seetharaman, K., Yao, N., Robutti, J. L., Percibaldi, N. M. y Eyherabide, G. H. 2006.** Relationship between popcorn composition and expansion volume and discrimination of corn types by using zein properties. *Cereal Chemistry*. 83(1): 86-92.

**Buléon, A., Gallant, D. J., Bouchet, B., Mouille, C., D’Hulst, C., Kossman, J. y Ball, S. 1998.** Starch granules structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 23: 85-112.

**Chiotelli, E. y Le Meste, M. 2002.** Effect of small and large wheat starch granules on thermo mechanical behavior of starch. *Cereal Chemistry*. 79(2): 286–293.

**Clark, R. M., Linton, E., Messing, J. y Doebley, J. F. 2004.** Pattern of diversity in the genomic region near the maize domestication gene *tb1*. *Proceedings National Academy Sciences USA*. 101(3): 700-707.

**Cohen, J. I. y Galinat, W. C. 1984.** Potential use of alien germplasm for maize improvement. *Crop Science*. 24: 1011-1015.

**Collins, G. N. 1921.** Teosinte in México. *The journal of heredity*. 12: 339-350.

**CONABIO. 2008a.** Proyecto FZ002: Conocimiento de la diversidad y distribución actual del maíz nativo y sus parientes silvestres en México. Componente 2: Distribución geográfica del teocintle (*Zea spp.*) en México y situación actual de las poblaciones. Jalisco, México.

**CONABIO. 2008b.** Clave FZ001: Estudio de la diversidad genética y su distribución de los maíces criollos y sus parientes silvestres en Michoacán. Proyecto global de maíces nativos. Anexo 8. Resultados de proyectos. Responsable del proyecto: Carrera Valtierra, José Alfredo. Universidad Autónoma Chapingo-Centro Regional Universitario Centro Occidente.

**CONABIO. 2008c.** Documento de trabajo para el taller: Agrobiodiversidad en México: el caso del Maíz. Documento I: Información biológica-agronómica básica sobre los maíces nativos y sus parientes silvestres.

**de Wet**, J. M. J. y Harlan, J. R. **1972**. Origin of maize: The tripartite hypothesis. *Euphytica*. 21: 271-279.

**de Wet**, J. M. J. y Harlan, J. R. **1976**. Cytogenetic evidence for the origin of teosinte (*zea mays ssp. mexicana*). *Euphytica*. 25: 447.

**de Wet**, J. M. J., Harlan, J. R., Lambert, R. J. y Engle, L. M. **1972**. Introgression from *Tripsacum* into *Zea* and the origin of maize. *Caryologia* 25: 25-31.

**Doebley**, J. F. **1983**. The maize and teosinte male inflorescence: a numerical taxonomic study. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 70: 32-70.

**Doebley**, J. F. **1990**. Molecular evidence and the evolution of maize. *Economic Botany*. 44(supplement): 6-27.

**Doebley**, J. F. **1992**. Mapping the genes that made maize. Elsevier Science Publisher. 8(9): 302-307.

**Doebley**, J. F. **2003**. The taxonomy of *Zea*; The morphology of maize and teosinte. <http://teosinte.wisc.edu/morphology.html>; consultado enero 2011.

**Doebley**, J. F. **2004**. The genetics of maize evolution. *Annual Review of Genetics*. 38: 37-59.

**Doebley**, J. F. y Iltis H. H. **1980**. Taxonomy of *Zea* (Gramineae) I. A subgeneric classification with key to taxa. *American Journal of Botany*. 67(6): 982-993.

**Doebley**, J. F. y Stec, A. **1991**. Genetic analysis of the morphological differences between maize and teosinte. *Genetics*. 129: 285-295.

**Doebley**, J. F. y Stec, A. **1993**. Inheritance of the morphological differences between maize and teosinte: comparison of results for two F<sub>2</sub> populations. *Genetics*. 134: 559-570.

**Doebley**, J. F., Goodman, M. M. y Stuber, C. W. **1984**. Isoenzymatic variation in *Zea* (Gramineae). *Systematic Botany*. 9(2): 203-218.

**Doebley**, J. F., Goodman, M. M. y Stuber, C. W. **1987**. Patterns of isozyme variation between maize and mexican annual teosinte. *Economic Botany*. 41(2): 234-246.

**Doebley**, J. F., Stec, A., Wendel, J. y Edwards, M. **1990**. Genetic and morphological analysis of a maize-teosinte F<sub>2</sub> population: Implications for the origin of maize. *Proceedings National Academy Sciences USA*. 87: 9888-9892.

**Dombrink**, K. M. A. y Knutson, C. A. **1997**. A study of maize endosperm hardness in relation to amylose content and susceptibility to damage. *Cereal Chemistry*. 74(6): 776–780.

**Dorweiler**, J. y Doebley, J. F. **1997**. Developmental analysis of teosinte glume architecture 1: A key locus in the evolution of maize (Poaceae). *American Journal of Botany*. 84: 1313-1322.

**Dorweiler**, J., Stec, A., Kermicle, J. y Doebley, J. F. **1993**. Teosinte glume architecture 1: A genetic locus controlling a key step in maize evolution. *Science*. 262: 233-235.

**Eubanks**, M. W. **1995**. A cross between two maize relatives: *Tripsacum dactyloides* and *Zea diploperennis* (Poaceae). *Economic Botany*. 49(2): 172-182.

**Eubanks**, M. W. **2001**. The mysterious origin of maize. *Economic Botany*. 55(4): 492-514.

**Fannon**, J. E., Hauber, R. J. y BeMiller, J. N. **1992**. Surface pores of starch granules. *Cereal Chemistry*. 69(3): 284-288.

**FAO**. **1998**. Los almidones tropicales no llegan al mercado. Enfoques. Consultado mayo 2011. <http://www.fao.org/ag/esp/revista/9809/spot3.htm>

**Fennema**, O. R. **2000**. Química de los alimentos. Acribia Editorial. 2ª Ed. España. 228-245.

**Figuroa**, J. D. C. y Aguilar, R. **1997**. El origen del maíz. *Avance y perspectiva*. 16: 91-98.

**Figuroa**, J. D. C., Hernández, Z. J. E., Véles, M. J. J., Rayas, D. P., Martínez, F. H. E., y Ponce, G. N. **2011**. Evaluation of degree of elasticity and other mechanical properties of wheat kernels. *Cereal Chemistry*. 88(1): 12–18

**Finnie**, C. y Svensson, B. **2003**. Feasibility study of a tissue-specific approach to barley proteome analysis: aleurone layer, endosperm, embryo and single seeds. *Journal of Cereal Science*. 38: 217-227.

**Franco**, C. M. L., Ciacco, C. F. y Tavares, T. Q. **1998**. The structure of waxy corn starch: effect of granule size. *Starch/Stärke*. 50(5): 193–198.

**Fukunaga**, K., Hill, J., Vigouroux, Y., Matsuoka, Y., Sánchez, J. J., Liu, K., Buckler, E. S. y Doebley, J. F. **2005**. Genetic diversity and population structure of teosinte. *Genetics*. 169: 2241-2254.

**Galinat**, W. C. **1963**. Form and function of plant structures in the American Maydeae and their significance for breeding. *Economic Botany*. 17: 51-59.

**Galinat, W. C. 1970.** The cupule and its role in the origin and evolution of maize. University Massachusetts Agricultural Experiment Station Bulletin 585.

**Galinat, W. C. 1971.** The origin of maize. *Annual Review of Genetics*. 5: 447-478.

**Galinat, W. C. 1973.** Intergenomic mapping of maize, teosinte and *Tripsacum*. *Evolution*. 27: 644-655.

**Galinat, W. C. 1977.** Corn and corn improvement: The origin of corn. Edited by Sprague, G. F. *Agronomy* 18. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA: 1-47.

**Galinat, W. C. 1978.** Maize breeding and genetics: The inheritance of some traits essential to maize and teosinte. Edited by Walden, D. B. John Wiley and Sons, New York, USA: 93-111.

**Galinat, W. C. 1988.** Corn and Corn Improvement. The origin of corn. Edited by Sprague, G. F. and J. W. Dudley. Series *Agronomy*. Number 18. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc. Publishers, Madison, Wisconsin, U. S. A: 1- 31.

**Galinat, W. C. 1992.** Evolution of corn. *Advances in Agronomy*. 47: 203-231.

**Galinat, W. C. 1995.** The origin of maize: grain of humanity. *Economic Botany*. 49(1): 3-12.

**Gaytán, M. M., Figueroa, J. D. C., Reyes, V. M. L., Rincón, S. F. y Morales, S. E. 2006.** Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29(2): 135-139.

**Geera, B. P., Nelson, J. E., Souza, E., y Huber, K. C. 2006.** Composition and properties of A- and B-type starch granules of wild-type, partial waxy, and waxy soft wheat. *Cereal Chemistry*. 83(5): 551-557.

**Gellrich, C., Schieberle, P. y Wieser, H. 2003.** Biochemical characterization and quantification of the storage protein (secalin) types in rye flour. *Cereal Chemistry*. 80(1): 102-109.

**Godínez, H. J. J., Sánchez, G. J. J., Ron, P. J. y Santacruz, R. F. 2009.** Estimación de reducciones en tamaño efectivo de población en teocintle del Occidente de México. *Scientia-CUCBA*. 11(1-2): 11-21.

**Goodman, M. M. 1988.** The history and evolution of maize. *CRC Critical Reviews in Plant Sciences*. 7(3): 197-220.

**Greffeuille, V., Abecassis, J., Lapierre, C., y Lullien, P. V. 2006.** Bran size distribution at milling and mechanical and biochemical characterization of common

wheat grain outer layers: A relationship assessment. *Cereal Chemistry*. 83(6): 641–646.

**Guzmán, M. R. 1978.** Una nueva localidad para el teocintle *Zea perennis* y primer reporte de *Zea mexicana* para Jalisco. *Bol. Inf. Instituto de Botanica de la Universidad de Guadalajara*. Época IV (1):9-10.

**Guzmán, M. R. y Iltis, H. H. 1991.** Protección a genes de maíz en una reserva de la biosfera. *Diversity*. 7: 89-92.

**Hamada, J. S. 1997.** Characterization of protein fractions of rice bran to devise effective methods of protein solubilization. *Cereal Chemistry*. 74(5): 662-668.

**Harshberger, J. W. 1896.** Maize, a botanical and economic study. *Contributions of the Botanical Laboratory, University of Pennsylvania, Philadelphia*: 75-202.

**Holst, I., Moreno, J. E., y Piperno, D. R. 2007.** Identification of teosinte, maize, and *Tripsacum* in Mesoamerica by using pollen, starch grains, and phytoliths. *Proceedings National Academy Sciences USA*. 104(45): 17608–17613.

**Iltis, H. H. 1972.** The taxonomy of *Zea mays* (Gramineae). *Phytologia*. 23: 248-249.

**Iltis, H. H. 1983.** From teosinte to maize: The catastrophic sexual transmutation. *Science*. 222: 886-894.

**Iltis, H. H. 1988.** Grass systematics and evolution: Maize evolution and agricultural origins. Edited by Soderstrom, T. R., Hilu, K. W., Campbell, C. S. y Barkworth, M. E. *Smithsonian Institution Press, Washington, D. C.*: 195- 213.

**Iltis, H. H. 2000.** Homeotic sexual translocations and the origin of maize (*Zea mays*, Poaceae): A new look at an old problem. *Economic Botany*. 54(1): 7-42.

**Iltis, H. H. y Benz, B. F. 2000.** *Zea nicaraguensis* (Poaceae), a new teosinte from pacific coastal Nicaragua. *Novon*. 10: 382-390.

**Iltis, H. H. y Doebley, J. F. 1980.** Taxonomy of *Zea* (Gramineae) II. Subspecific categories in the *zea mays* complex and a generic synopsis. *American Journal Botany*. 67(6): 994-1004.

**Iltis, H. H., Doebley, J. F., Guzmán, M. R., y Pazy, B. 1979.** *Zea diploperennis* (Gramineae): a new teosinte from Mexico. *Science*. 203: 186-188.

**Jugenheimer, R. W. 1988.** Maíz, variedades mejoradas, métodos de cultivo y producción de semillas. *Limusa, México*: 841.

**Kato, Y. T. A. 1976.** Cytological studies of maize (*Zea mays* L.) and teosinte (*Zea mexicana* Schrader Kuntze) in relation to their origin and evolution. Massachusetts Agricultural Experiment Station Bulletin 635.

**Kato, Y. T. A. 1984.** Chromosome morphology and the origin of maize and its races. *Evolutionary Biology*. 17: 219-253.

**Kato, Y. T. A. 2005.** Cómo y dónde se originó el maíz. *Investigación y Ciencia*. 347: 68-72.

**Kato, Y. T. A. y López, R. A. 1990.** Chromosome knobs of the perennial teosintes. *Maydica*. 35: 125-141.

**Kato, Y. T. A., Mapes, C., Mera, L. M., Serratos, J. A. y 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. México, D. F.: 19-22.

**Lauter, N. y Doebley, J. F. 2002.** Genetic variation for phenotypically invariant traits detected in teosinte: Implications for the evolution of novel forms. *Genetics* 160: 333-342.

**Liu, H., Li, M., Chen, P., Yu, L., Chen, L. y Tong, Z. 2010.** Morphologies and thermal properties of hydroxypropylated high-amylose corn starch. *Cereal Chemistry*. 87(2): 144–149

**Liu, Q. 2005.** Food carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications, understanding starches and their role in foods. Edited by Cui, S. W. CRC Press, Taylor and Francis Group LLC: 310-349.

**Loáisiga, C. H., Brantestam, A. K., Diaz, O. Salomon, B. y Merker, A. 2010.** Genetic diversity in seven populations of Nicaraguan teosinte (*Zea nicaraguensis* Iltis et Benz) as estimated by microsatellite variation. *Genet Resour Crop Evol.* s/n.

**López, P, P. 2011.** Efecto de microondas e infrarrojo en la calidad maltera de cebada (*Hordeum vulgare* L.). Universidad Autónoma de Querétaro. Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias de los alimentos. 54-57.

**MacGregor, A. W. y Ballance, D. L. 1980.** Hydrolisis of large and small starch granules from normal and waxy barley cultivars by alpha-amylases barley malt. *Cereal Chemistry*. 57(6): 397-402.

**Mangelsdorf, P. C. 1947.** The origin and evolution of maize. *Advances in Genetics*. 1: 161-207.

**Mangelsdorf, P. C. 1974.** Corn, Its Origin, Evolution, and Improvement. The Belknap Press of Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts.

**Mangelsdorf, P. C. y Reeves, R. G. 1939.** The origin of indian corn and its relatives. Texas Agricultural Experiment Station Bulletin 574: 1-315.

**Mangelsdorf, P. C., MacNeish, R. S. y Galiant, W. C. 1964.** Domestication of corn. Science. 143: 538-545.

**Mangelsdorf, P. C., Roberts, L. M. y Rogers J. S. 1981.** The probable origin of annual teosintes. The Bussey Institution of Harvard University. Publication Number 10: 39-69.

**Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sánchez, J. J., Buckler, E. y Doebley, J. F. 2002.** A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. Proceedings of the National Academy of Sciences. 99(6): 6080-6084.

**McClintock, B. 1978.** Maize breeding and genetics: Significance of chromosome constitutions in tracing the origin and migration of races of maize in the Americas. Edited by Walden, D. B. John Wiley and Sons, New York, USA: 159-184.

**McClintock, B., Kato, Y. T. A. y Blumenschein, A. 1981.** Chromosome constitution of races of maize. Its significance in the interpretation of relationships between races and varieties in the Americas. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico. s/p.

**McDonough, C. M., Anderson, B. J., y Rooney, L. W. 1997.** Structural characteristics of steam-flaked sorghum. Cereal Chemistry. 74(5): 542-547.

**McPherson, A. E., y Jane, J. 2000.** Extrusion of cross-linked hydroxypropylated corn starches II. Morphological and molecular characterization. Cereal Chemistry. 77(3): 326-332.

**Melhus, I. E., Aguirre, F. y Scrimshaw, N. S. 1953.** Observations on the nutritive value of teosinte. Science. 117: 34-35.

**Microscopia Electrónica de Barrido. 2008.** Hipertextos del área de biología. Disponible en <http://www.biologia.edu.ar/microscopia/meb.htm#Microscopía%20electrónica>; <http://www.unl.edu/CMRAcfem/em.htm>, consultado en febrero 2011.

**Mua, J. P. y Jackson, D. S. 1997.** Fine structure of corn amylase and amylopectin fractions with varios molecular weights. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 45: 3840-3847.

**Narváez, G. E. D., Figueroa, J. D. C. y Taba, S. 2007a.** Aspectos microestructurales y posibles usos del maíz de acuerdo con su origen geográfico. Revista Fitotecnia Mexicana. 30(3): 321-325.



**Narváez, G. E. D., Figueroa, J. D. C., Taba, S., Castaño, T. E., y Martínez, P. R. A. 2007b.** Effect of starch granule size on the thermal and pasting properties of maize. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30(3): 269–277.

**Nault, L. R. y Findley, W. R. 1981.** *Zea diploperennis*: A primitive relative offers new traits to improve corn. *Desert Plants*. 2(4): 203–205.

**Nault, L. R., Gordon, D. T., Damsteegt, V. D. y Iltis, H. H. 1982.** Response of annual and perennial teosintes (*Zea*) to six maize viruses. *Plant Disease*. 66: 61-62.

**Norma Oficial Mexicana SEMARNAT 2001, NOM-059-ECOL-1994,** que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección.

**Perera, C., Lu, Z., Sell, J., y Jane, J. 2001.** Comparison of physicochemical properties and structures of sugary-2 cornstarch with normal and waxy cultivars. *Cereal Chemistry*. 78(3): 249-256.

**Pérez, S. y Bertoft, E. 2010.** The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch/Stärke*. 62: 389–420

**Ponce, G. N., Figueroa, J. D. C., López, H. G. A., Martínez, H. E. y Martínez, P. R. 2008.** Study of visco-elastic properties of wheat kernels using the compression load method. *Cereal Chemistry*. 85(5): 667-672.

**Qi, X., Tester, R. F., Snape, C. E., Yuryevc, V., Wassermanc, L. A. y Ansell, R. 2004.** Molecular basis of the gelatinisation and swelling characteristics of waxy barley starches grown in the same location during the same season. Part II. Crystallinity and gelatinisation characteristics. *Journal of Cereal Science* 39: 57–66

**Quintanar, G. A., Jaramillo, F. M. E., Mora, E. R., Chel G. L. y Solorza, F. J. 2009.** Changes on the structure, consistency, physicochemical and viscoelastic properties of corn (*Zea mays* sp.) under different nixtamalization conditions. *Carbohydrate Polymers*. 78: 908–916.

**Raeker, M. Ö., Gaines, C. S., Finney, P. L., y Donelson, T. 1998.** Granule size distribution and chemical composition of starches from 12 soft wheat cultivars. *Cereal Chemistry*. 75(5): 721-728.

**Randolph, L. F. 1976.** Contributions of wild relatives of maize to the evolutionary history of domesticated maize: a synthesis of divergent hypotheses I. *Economic Botany*. 30: 321- 34.

**Reeves, R. G. 1950.** The use of teosinte in the improvement of corn inbreds. *Agronomy Journal*. 42: 248-251.

**Reid, D. S., Hsu, J. y Kerr, W. 1993.** The glassy state in foods: Calorimetry. Edited by Blanshard, J. M. V. y Lillford, P. J. Nottingham University Press, Reino Unido: 123-132.

**Rhoades, M. M. y Dempsey, E. 1953.** Cytogenetic studies of deficient-duplicate chromosomes derived from inversion heterozygotes in maize. *American Journal of Botany*. 40: 405-424.

**Rhoades, M. M. y Dempsey, E. 1966.** The effect of abnormal chromosome 10 on preferential segregation and crossing over in maize. *Genetics*. 53(5): 989-1020.

**Rodríguez, C. A. 2010.** Efecto del calentamiento con microondas en las propiedades fisicoquímicas de los granos de maíz y su relación con la calidad de masa y tortilla. Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional. Unidad Querétaro. Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias en la especialidad de materiales. 59-71.

**Rojas, M. I., Gutierrez C. E., Palacios, F. A., Baños L., Pons, H. J. L., Guzmán, M. S. H., Pineda G. P., y Rodríguez, M. E. 2007.** Study of structural and thermal changes in endosperm of quality protein maize during traditional nixtamalization process. *Cereal Chemistry*. 84(4): 304-312.

**Rusnak, B. A., Chou, C. y Rooney, L. W. 1980.** Effect of micronizing on kernel characteristics of sorghum varieties with different endosperm type. *Journal Food Science*. 45: 1529-1532.

**Sánchez, J. J. y Ruíz, J. A. 1995.** Distribución del teocintle en México. En: Serratos, J. A., Willcox, M. C. y Castillo, F. Memoria del foro. Flujo genético entre maíz criollo, maíz mejorado y teocintle: implicaciones para el maíz transgénico. CIMMYT, El Batán, Estado de México. 20-38. <http://apps.cimmyt.org/spanish/docs/proceedings/geneflow/memoriasdel foro.pdf>

**SAS, Statistical Analysis System. 2009.** User's Guide Version 9.2, SAS Institute Inc. Cary, NC. 2009.

**Seetharaman, K., Tziotis, A., Borrás, F., White, P. J., Ferrer, M., y Robutti, J. 2001.** Thermal and functional characterization of starch from argentinean corn. *Cereal Chemistry*. 78(4): 379–386.

**Singh, S. K., Singh, N., Kaur, M. 2004.** Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological, and rheological properties of starches. *Journal of Food Engineering*. 64: 119–127.

**Smith, J. S. C., Goodman, M. M. y Kato, Y. T. A. 1982.** Variation within teosinte. II. Numerical analysis of chromosome knob data. *Economic botany*. 36(1): 100-112.

- Smith, J. S. C., Goodman, M. M. y Lester, R. N. 1981.** Variation within teosinte. I. Numerical analysis of morphological data. *Economic botany*. 35(2): 187-203.
- Smith, J. S. C., Goodman, M. M. y Stuber, C. W. 1984.** Variation within teosinte. III. Numerical analysis of allozyme data. *Economic botany*. 38(1): 97-113.
- Stasiak, M., Molenda, M. y Horabik, J. 2007.** Determination of modulus of elasticity of cereals and rapeseeds using acoustic method. *Journal of Food Engineering*. 82: 51-57.
- Steffe, J. F. 1996.** Rheological methods in food process engineering. 2a. edición. Freeman Press. United States of America. 1-7.
- Sundberg, M. D., y Orr, A. R. 1986.** Early inflorescence and floral development in *Zea diploperennis*, diploperennial teosinte. *American Journal of Botany*. 73(12): 1699-1712.
- Sundberg, M. D., y Orr, A. R. 1990.** Inflorescence development in two annual teosintes: *Zea mays* ssp. *mexicana* and *Zea mays* ssp. *parviglumis*. *American Journal of Botany*. 77(2): 141-152.
- Tang, H. F., Ando, H., Watanabe, K., Takeda, Y. y Mitsunaga, T. 2000.** Some physicochemical properties of small-, medium-, and large-granule starches in fractions of waxy barley grain. *Cereal Chemistry*. 77(1): 27–31.
- Tantravahi, R. V. 1968.** Cytology and crossability relationships of *Tripsacum*. Ph.D. Thesis, The Bussey Institution, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Tester, R. F., Karidakis, J., y Qi, X. 2004.** Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal Cereal Science*. 39: 151-165.
- Tester, R. F., Qi, X. y Karkalas, J. 2006.** Hydrolysis of native starches with amylases. *Animal Feed Science and Technology*. 130: 39-54.
- Thomas, D. J. y Atwell, W. A. 1998.** Starches. Eagan Press. USA. 49-55.
- Thompson, D. B. 2000.** On the non-random nature of amylopectin branching. *Carbohydrate Polymers*. 43: 223–239.
- Utrilla, C. R. G., Agama, A. E., Barba de la Rosa, A. P., Rodríguez, A. S. L., y Bello, P. L. A. 2010.** Physicochemical and enzyme characterization of small and large starch granules isolated from two maize cultivars. *Cereal Chemistry*. 87(1): 50–56.
- Varriano, M. E. y Zeleznak, K. 1982.** Pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke) and grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) ultrastructure. *American Journal of Botany*. 69: 1306-1313.

**Waddington, C. H. 1953.** “The Baldwin effect”, genetic assimilation and homeostasis. *Evolution*. 7(4): 386-387.

**Wang, H., Nussbaum, W. T., Li, B., Zhao, Q., Vigouroux, Y., Faller, M., Bomblies, K., Lukens, L., y Doebley, J. F. 2005.** The origin of the naked grains of maize. *Nature Publishing Group* 436(4): 714-719.

**Warburton, M. L., Wilkes, G., Taba, S., Charcosset A., Mir, C., Dumas, F., Madur, D., Dreisigacker, S., Bedoya, C., Prasanna, B. M., Xie, C. X., Hearne, S., y Franco, J. 2011.** Gene flow among different teosinte taxa and into the domesticated maize gene pool. *Genet Resour Crop Evol.* Publicado online.

**White, S. E. y Doebley, J. F. 1999.** The molecular evolution of *terminal ear1*, a regulatory gene in the genus *Zea*. *Genetics*. 153: 1455-1462.

**Wilkes, H. G. 1967.** Teosinte: The closest relative of maize. The Bussey Institution of Harvard University: 159.

**Wilkes, H. G. 1970.** Teosinte introgression in the maize of the Nobogame Valley. *Botanical Museum Leaflets*. Harvard University. 22: 297-311.

**Wilkes, H. G. 1972.** Maize and its wild relatives. *Science*. 177: 1071-1077.

**Wilkes, H. G. 1977.** Hybridization of maize and teosinte, in México and Guatemala and the improvement of maize. *Economic botany*. 31: 254-293.

**Wilkes, H. G. 1979.** Mexico and Central America as a centre for the origin of agriculture and the evolution of maize. *Crop Improvement*. 6(1): 1–18.

**Wilkes, H. G. 1995.** El teocintle en México: Panorama retrospectivo y análisis personal. En: Serratos, J. A., Willcok, M. C. y Castillo, F. Memoria del foro. Flujo genético entre maíz criollo, maíz mejorado y teocintle: implicaciones para el maíz transgénico. CIMMYT, El Batán, Estado de México: 11-19. <http://apps.cimmyt.org/spanish/docs/proceedings/geneflow/memoriasdel foro.pdf>

**Wilkes, H. G. 2004.** Corn: origin, history, technology, and production. *Corn, strange and marvelous: But is a definitive origin known?* Edited by Smith, C. W., Betran, J. y Reinge, E. C. A. John Wiley and Sons, Inc. New York USA: 3-63.

**Wilson, J. D., Betchel, D. B., Tood, T. C. y Seib, P. A. 2006.** Measurement of wheat starch granule size distribution using image analysis and laser diffraction technology. *Cereal Chemistry*. 83(3): 259-268.

**Zobel, H. F. 1988.** Starch crystal transformation and their industrial importance. *Starch/Stärke*. 40: 1-7.