



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN AMILOSA / AMILOPECTINA Y DE
ALGUNAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE MAÍCES CRIOLLOS
ENFOCADAS A SUS USOS POTENCIALES



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO DE ALIMENTOS

PRESENTA

ARMANDO HERNÁNDEZ GARCÍA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado

Presidente	Prof. Hermilo Leal Lara
Vocal	Profa. Amanda Gálvez Mariscal
Secretario	Profa. Julieta Sandoval Guillén
1er Suplente	Profa. María del Rocío Santillana Hinojosa
2º Suplente	Prof. Armando Conca

Sitio en donde se desarrollo el tema:

Departamento de Alimentos y Biotecnología de la Facultad de Química,
UNAM,

Laboratorio 312, Conjunto E.

Nombre completo y firma del asesor del tema:

Dra. Amanda Gálvez Mariscal

Nombre completo y firma del sustentante:

Armando Hernández García

AGRADECIMIENTOS

A la universidad número 1 en Iberoamérica, la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de adquirir una formación científica de excelencia y de prepararme profesionalmente con una visión social y de servicio a mi país.

Al Maíz por enamorarme con sus sueños y milenarios secretos.

A la Dra. Amanda Gálvez Mariscal por todo su apoyo, enseñanzas, tiempo y conocimiento compartido, así como darme la confianza para desarrollar este trabajo.

A la QFB Julieta Sandoval y a la M. en C. Ángeles Valdivia por el apoyo para realizar los análisis de almidón, así como por todas las facilidades prestadas para el uso de equipos y material del laboratorio 323, Conjunto E.

Al QFB Agustín Reyó por permitirme tener acceso a equipos y material para realizar los análisis proximales y físicos, así como la molienda de las muestras de maíz.

Al Sr. Enrique Fernández de PORTIMEX S. A. de C. V. por proporcionarnos muestras de maíces Criollos y de maíces híbridos sin las cuales no se hubiera podido realizar este trabajo.

A la Q. Margarita Portilla de la unidad de análisis térmico de la USAI por apoyarnos en la realización de los análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido.

Al M. en C. Luis Antonio Rosales de la unidad de Microscopía de la USAI por ayudarnos en la obtención de las micrografías de Microscopía electrónica de Barrido.

A la M. en C. Idalia Flores Arguello por los consejos y asesorías prestados durante la tesis.

Al Dr. Tecante por darnos la muestra de almidón céreo.

A todos mis amig@s, compañer@s y enemigos del laboratorio 312 por apoyarme siempre, en especial en los momentos difíciles, por tener alguien con quien discutir los resultados, por darme consejos sobre la tesis cuando los necesitaba, así como por todo lo que aprendí de ustedes.

DEDICATORIAS

A mis padres, por hacer posible todo esto

A todos mis amigos, por lo que significan en mi vida

*Al mundo, por motivarme a seguir conociendo e intentar transformar la
realidad*

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
Objetivos	4
1. <i>Objetivo General</i>	
2. <i>Objetivos Particulares</i>	
CAPÍTULO I	
Antecedentes	5
1. <i>El maíz y su cultivo</i>	5
a. Generalidades del maíz	5
b. Origen e historia del maíz	6
c. Diversidad del maíz	7
d. Definiciones	10
i. Raza y variedad	10
ii. Maíz criollo e híbrido	11
e. Clasificación del maíz	12
2. <i>El maíz y su importancia</i>	14
a. Impacto económico e industrial	14
b. Usos tradicionales	15
c. Usos Industriales y principales procesamientos	15
3. <i>El maíz y su composición</i>	17
a. Composición del grano	17
b. Composición proximal del maíz	19
4. <i>El Almidón y sus características</i>	20
a. Estructura del gránulo y del almidón	20
b. Estructura de la Amilosa	24
c. Estructura de la Amilopectina	26
d. Métodos de cuantificación de la relación amilosa/amilopectina	27
5. <i>El Almidón y sus propiedades fisicoquímicas</i>	29
a. Gelatinización e Hinchamiento	30
b. Métodos para medir la gelatinización	32
c. Retrogradación	33
CAPÍTULO II	
Materiales y Métodos	34
1. <i>Pruebas de Plataforma</i>	35
a. Peso Hectolítrico	35
b. Índice de Flotación	36
c. Peso de 1000 granos	36
2. <i>Análisis Proximal</i>	37
a. Molienda	37

b. Humedad	38
c. Cenizas	38
d. Proteínas	38
e. Grasa	39
f. Almidón	39
3. <i>Determinación de la relación amilosa y amilopectina en harinas</i>	40
4. <i>Aislamiento de almidón</i>	41
5. <i>Microscopía electrónica de barrido (MEB)</i>	43
6. <i>Calorimetría diferencial de barrido (CDB)</i>	43
7. <i>Propiedades de Absorción de Agua (Poder de Hinchamiento y % Sólidos solubles) a pH neutro y Alcalino</i>	44
8. <i>Parámetros de Nixtamalización</i>	46
9. <i>Análisis estadístico</i>	48

CAPÍTULO III

Resultados y Discusión

Resultados y Discusión	49
1. <i>Recolección de muestras y pruebas físicas</i>	49
a. Muestras utilizadas	49
b. Pruebas Físicas	51
2. <i>Análisis Proximal</i>	52
3. <i>Relación Amilosa-Amilopectina</i>	56
a. Contenido de Amilosa en el Almidón	57
b. Contenido de Amilopectina en el Almidón	61
c. Consideraciones Generales sobre la Relación Amilosa/ Amilopectina	62
d. Amilosa y amilopectina en las harinas de las muestras	63
4. <i>Microscopía electrónica de barrido (MEB)</i>	64
5. <i>Calorimetría diferencial de barrido (CDB)</i>	70
<i>PICO 1</i>	
a. Parámetros de Temperatura de inicio (Ti), de pico (Tp), y de finalización (Tf)	72
b. Temperatura de inicio (Ti)	75
c. Temperatura de pico (Tp)	77
d. Intervalo de Gelatinización	78
e. Entalpía de Gelatinización (ΔH) y Entalpía de Gelatinización en base al contenido de amilopectina (ΔH_{amp})	78
f. Índice de Tamaño de Pico (ITP)	80
<i>PICO 2</i>	
g. Parámetros de complejos amilosa-lípido	81
h. Consideraciones Generales sobre la Gelatinización	83

6. <i>Propiedades de Absorción de Agua</i>	84
<i>pH Neutro</i>	
a. Poder de Hinchamiento de Almidón	88
b. Poder de Hinchamiento de Harina	91
c. Porcentaje de Sólidos solubles en Harina y Almidón	93
<i>pH Alcalino</i>	
d. Poder de Hinchamiento de Almidón	96
e. Poder de Hinchamiento de Harina	100
f. Porcentaje de Sólidos solubles en Harina y Almidón	101
7. <i>Parámetros de Nixtamalización</i>	103
Conclusiones	106
Perspectivas	109
Bibliografía	110
Apéndice 1	
Termogramas de las variedades estudiadas de maíces	118
Apéndice 2	
Correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas de los Almidones	125
Apéndice 3	
Correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas de las Harinas	126
Apéndice 4	
Correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas de los Granos	127

INTRODUCCIÓN

El maíz es una especie muy diversa, con una gran adaptabilidad a las zonas geográficas que habita y originaria de México, según indican los hallazgos arqueológicos. En México existe un amplio número de razas, y una cantidad aun mayor de variedades nativas, conocidas como criollos, las cuales juegan un papel intrínseco muy importante a un nivel ecológico, ya que conservan los recursos genéticos de esta especie.

Por otro lado, el maíz es uno de los cereales de mayor importancia económica y alimentaria en el mundo, es el tercer producto agrícola con mayor superficie cultivada (después del arroz y el trigo) con 142×10^6 Hectáreas, así como, el primer lugar en producción mundial y productividad, con 637×10^6 Toneladas por año y 3.41 Tonelada/Hectárea, respectivamente. En México ocupa el 50% del total de la superficie cultivada. Además, tiene una importancia cultural indudable dentro de nuestra sociedad, no solo es un alimento, es un participante fundamental en la definición de la identidad de la cultura mexicana a la par que nutre. Sin duda alguna, la repercusión que tiene el maíz es de gran relevancia.

Los maíces criollos son resultado de la manipulación y selección ancestral por parte de los campesinos y muestran una gran diversidad en sus características tales como tamaño, color, composición, propiedades fisicoquímicas, entre otras. Muchas de estas variedades tienen un sin número de aplicaciones culinarias y alimentarias en la esfera tradicional, pero a nivel industrial

prácticamente no son utilizadas, ya que son preferidas las variedades híbridas debido a su poca variabilidad y por lo tanto mayor facilidad de estandarización. Debido a esto muchas de las razas criollas mexicanas no han sido suficientemente estudiadas en sus características, propiedades fisicoquímicas, usos y posibles aplicaciones, por lo que hay una imperante necesidad de investigar y generar conocimiento sobre estos maíces para que se definan sus usos potenciales y se dirijan hacia nichos comerciales, impactando positivamente en la revaloración e inclusive funcione como alternativa de conservación de estas variedades. Para esto es necesario contar con un catálogo de técnicas para poder caracterizarlos, entender sus propiedades, y así, poder definir los posibles usos potenciales que tengan.

En estudios anteriores se encontró que la relación amilosa/amilopectina está vinculada con la gelatinización y la capacidad de retención de agua del almidón, factores importantes en la elaboración de una masa óptima para el nixtamal. Además, ciertos autores como Tester y Morrison han señalado que la amilopectina es la molécula responsable del hinchamiento y de la absorción de agua al gelatinizarse, mientras que la amilosa al formar complejos de inclusión con los lípidos inhibe dicho proceso. Es así que se va investigar el rol que juegan estas moléculas en el hinchamiento bajo este supuesto, pero en este caso será en variedades de maíz criollo, tanto a pH neutro como a pH alcalino, el cual es el que impera en la nixtamalización, proceso con el cual se elaboran una múltiple gama de productos de maíz como tortillas, tostadas, totopos, algunos atoles, pozol, etc.

Si se logra determinar la naturaleza y el tipo de la relación existente entre la gelatinización y la absorción de agua con la amilosa y la amilopectina, entonces se avanzará en la caracterización de los criollos mexicanos y se aportarán elementos para el establecimiento de sus usos potenciales, además de entender el papel que desempeñan estas moléculas en la determinación de parámetros importantes a nivel alimentario.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Caracterizar la relación amilosa-amilopectina y otras propiedades fisicoquímicas de variedades de maíces criollos enfocándolas a sus usos potenciales

Objetivos Particulares:

-  Definir la forma en que la relación amilosa/amilopectina afecta las propiedades fisicoquímicas examinadas de harinas y almidones de maíces.
-  Fundamentar usos y aplicaciones de los maíces con base en su relación amilosa/amilopectina y propiedades fisicoquímicas
-  Verificar si existen diferencias en las propiedades fisicoquímicas entre maíces criollos y con los híbridos
-  Proponer y establecer metodologías para la caracterización de maíces criollos y el establecimiento de sus usos potenciales
-  Explorar la posibilidad de revalorar la importancia de los criollos mediante su caracterización fisicoquímica y la de su relación amilosa/amilopectina y la recomendación de sus posibles aplicaciones tecnológicas



I. Antecedentes

1. El maíz y su cultivo

El maíz es una de las plantas más útiles y significativas para el hombre, es la base de la alimentación en Mesoamérica desde tiempos ancestrales, así como en ciertas zonas de África y del mundo donde su cultivo y consumo ha sido introducido recientemente. Su cultivo presenta ciertas características que le han dado gran relevancia e importancia a nivel agroecológico, alimentario, nutricional y a partir de esto trascendencia económica y social.

a) Generalidades del maíz

El maíz es una planta herbácea perteneciente a la familia *Gramineae*, tiene una raíz fibrosa ramificada y un tallo central erecto con nudo y entrenudos llamados cañutos ubicados en zonas opuestas. Es una especie de polinización cruzada y tiene por separado flores masculinas y femeninas en la misma planta (figura 1) (Bartolini, 1990; Farnham, 2003).

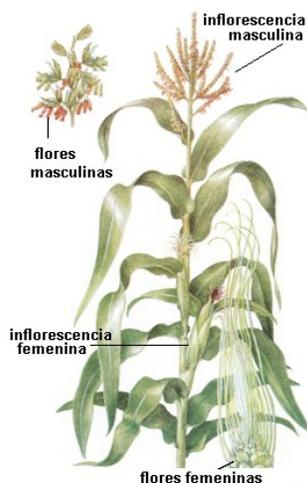


Figura 1. Dibujo de una planta de maíz



De acuerdo con la raza, las mazorcas tienen de 8 a 16 hileras de granos y en cada una de ellas de 8 a 70 granos o semillas; algunas mazorcas llegan a tener mil o más granos. Estos pueden ser de tamaños y colores muy variados, y pueden romper el orden lineal de la hilera y aparecer granos de diversos colores. (Bartolini, 1990)

Es una semilla de clima templado que requiere temperaturas de crecimiento más calientes que los granos pequeños, pero aun así muestra un pequeño crecimiento a temperaturas debajo de 10°C y por encima de 45°C. Constan variedades en las que el tamaño de la planta es de solo de 80 cm y en otras alcanzan hasta 5 metros de altura. Existen variedades de maíz que se han adaptado tanto a climas de los trópicos como de regiones templadas (latitud de 0 a 55°), a distintas composiciones y texturas de los suelos, a altitudes de nivel del mar y hasta de 2,400 metros y a temporadas de crecimiento de 42 a 400 días; también hay variedades que han desarrollado diferentes grados de resistencia a la sequía, los vientos, las heladas, la humedad o el calor excesivos y así como a pendientes muy pronunciadas del terreno. Como se muestra, el maíz ha llegado a ser el grano que de forma natural ha tenido la mayor adaptabilidad y variabilidad que cualquier otro grano (Bartolini, 1990; Farnham, 2003).

b) Origen e Historia del maíz

El maíz se originó en México. Las pruebas arqueológicas más antiguas (hace 7000 años, en 5000 a.C.) fueron encontradas en la cueva de San Marcos en el Valle de Tehuacan. La inflorescencia femenina de este maíz encontrado había alcanzado un grado de especialización que impidió la posibilidad de la diseminación natural de la semilla, es decir, el maíz mas antiguo conocido era dependiente de los humanos para su sobrevivencia.



Algunas teorías acerca del origen del maíz son, la del teocintle (*Zea mexicana*) y la del maíz tunicado (*Zea tunicata*), que es un ancestro del actual maíz domesticado. (Farnham, 2003).

1. Teoría del Teocintle. Propone que el teocintle es el antepasado silvestre del maíz y se sustenta no solo en el gran parecido que tienen sino en la compatibilidad sexual que presenta con el maíz, lo que hace que se puedan cruzar y establecer un flujo genético entre ellas.
2. Teoría del maíz tunicado. Propone que el maíz proviene del maíz tunicado (*Zea tunicata*), una variedad muy peculiar en la que cada grano está envuelto en pequeñas hojas, similares a las que cubren las mazorcas (Sánchez y Chuela, 1995).

De cualquier forma tal y como se le conoce en los últimos miles de años, el maíz es producto del hombre, existe solo en conjunto con el hombre, pues es este el encargado de su reproducción, siembra, cuidado y cosecha, y sin él sería aniquilado por otras plantas y no podría reproducirse, a diferencia de otros cereales, lo cuales existen en forma silvestre (Llanos, 1984).

La mayoría de las razas modernas han sido derivadas de variedades desarrolladas por los agricultores ancestrales de México, Centroamérica y Sudamérica. Sin embargo en los últimos 100 años se ha desarrollado el maíz dentado amarillo, que es el que predomina en la franja maizera de Estados Unidos, así como en Canadá y parte de Europa hoy en día. (Farnham, 2003).

c) Diversidad del maíz

La diversidad de poblaciones nativas de maíz que son cultivadas en México por los agricultores de muchas comunidades rurales es asombrosa e invaluable. México es la



cuna de la domesticación del maíz y centro de su diversificación. Por eso no es de extrañarse que México sea uno de los países de mayor variabilidad y diversidad genética del maíz en el mundo, solo superada por Perú (Valladolid, 2003). Algunos de los factores que han determinado la diversificación de los maíces han sido la pluralidad de condiciones naturales, climas y de los tipos de sistemas agroecológicos que se han establecido entre poblaciones de maíz y otros cultivos (Ortega, 2003; Aguilar, 2003; Hernandez 1985; Challenger, 1998). Pero también son resultado de la manipulación tradicional de los campesinos para obtener nuevas características, eliminar otras o mejorar su desempeño, es decir son maíces especializados que se resiembran temporada tras temporada, lo que implica que son variedades dinámicas en términos de adaptabilidad. De esta forma los agricultores que cultivan variedades locales o criollas de maíz en forma tradicional contribuyen a la conservación y a la generación de la diversidad genética *in situ* (Bommer, 1991), de esta manera llegan a formarse nuevos tipos, variedades o razas (Hernández, 1972; Dobzhansky, 1982). Cada población nativa tiene un intervalo de adaptación bastante restringido, pero la enorme diversidad de poblaciones que se han formado a través de milenios de evolución bajo domesticación le ha permitido prosperar en condiciones extremadamente contrastantes (Ortega, 2003).

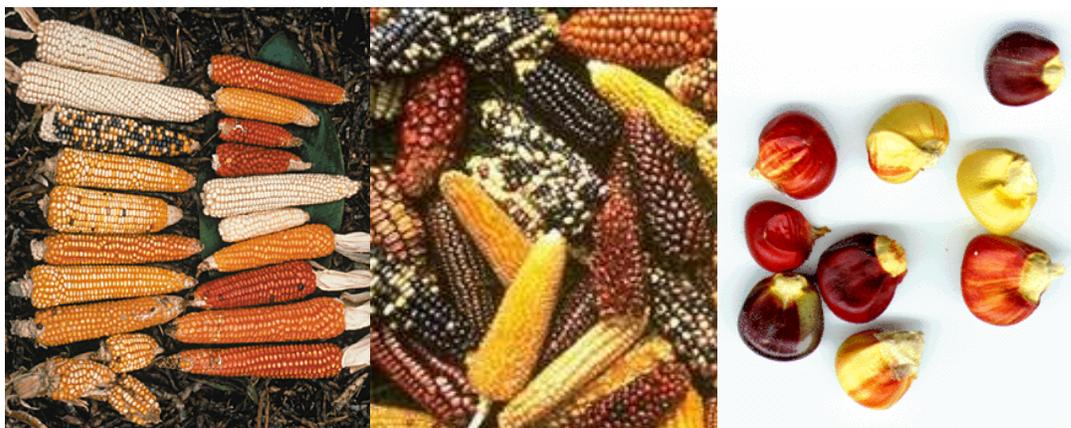


Figura 2. Diversidad del maíz



La evaluación de la diversidad genética del maíz y el establecimiento de sus razas y sus subdivisiones se realizan con base en caracteres morfológicos y agronómicos como altura de la mazorca, proporción de olote en la mazorca, número de hileras, diámetro de la mazorca, anchura y longitud del grano, volumen de grano y color de grano, entre otras. (Herrera, 2004). La diversidad del maíz en México se presenta en la tabla 1, en donde se agrupan por razas.

Tabla 1. Grupos de razas de maíces mexicanos, donde se muestra una gran diversidad de criollos (México 41 razas)

RAZAS DEL GRUPO I	RAZAS DEL GRUPO II	RAZAS DEL GRUPO III	RAZAS DEL GRUPO IV
Palomero Toluqueño, Palomero de Chihuahua, Arrocillo, Cónico, Elotes cónicos, cónico norteño, Chalqueño, complejo serrano de Jalisco, apachito, dulce, complejo cristalino chihuahua-gordo-azul, Cacahuacintle	Elotes occidentales-bofo, tabloncillo, tablilla, tabloncillo perla, bolita, ancho, jala, zamorano amarillo, blando, onaveño	Olotón, comiteco, tehua, olotillo, Celaya, tuxpeño, tuxpeño norte, vendeño, chiquito (Nal-Tel de altura), Nal-Tel, conejo, ratón, zapalote chico, Zapalote grande, Tepecintle, Pepitilla	Chapalote Reventador, Dulcillo del noroeste
TIPOS DE DUREZA EN LAS RAZAS: Suave, intermedia, semiduros. Casi no hay duros			
COLORES EN LAS RAZAS: Predominan los blancos, pero hay amarillos, morados, rojos, tonos intermedios, naranjas, cafés, lilas y combinados			

Fuente: Ortega, *et al.*, 1991 y Ortega, 2003

Respecto al número total de razas en México hay autores que dan cuenta de 59 razas haciendo un recuento de enumeraciones separadas (Sanchez, 2000), sin embargo la



mayoría de los expertos aceptan 41 razas (Ortega *et al.*, 1991). En Perú se contabilizan 55 razas de maíces (Valladolid, 2003).

La diversidad genética dentro de las mismas razas es muy dinámica, las razas no siempre actúan como entes discretos. Las causas de la variabilidad son adaptaciones a la heterogeneidad ambiental, aislamiento geográfico, recombinaciones entre razas aledañas, y selección de los agricultores para rendimiento o para usos culinarios específicos. La selección del maíz por parte de los agricultores debido a su preferencia para ciertos usos culinarios constituye una fuerza de estabilidad genética (Herrera, 2004). Es decir las formas en que los grupos étnicos usan el maíz tienen relación directa con la selección bajo domesticación (Hernández, 1972). Un ejemplo de esto es la raza del maíz Chalqueño el cual no es fácil de distinguir como tal (Herrera, 2004).

Bajo la luz de las consideraciones anteriores no es difícil establecer que la gran diversidad del maíz sea la base de la diversidad cultural que existe alrededor del maíz y sus productos en México.

d) Definiciones

En muchos casos en diversas fuentes no especializadas se maneja de forma poco precisa los términos híbrido y criollo, raza y variedad, lo que conlleva a una confusión y a una idea equivocada acerca de la diversidad y la diferenciación del maíz. Debido a esto es imperante definir estos conceptos, los cuales serán de mucha importancia para resaltar la diferencia entre una variedad criolla de maíz y un híbrido.

Raza y Variedad

Se considera a las razas como poblaciones de individuos de una misma especie con genotipos similares; que manifiestan ciertos rasgos diferenciales, heredables, y que a su



vez, permiten se pararlos de otras poblaciones. La formación de razas diferentes se origina por distintas modalidades de aislamiento que restringen la reproducción a un cierto número de individuos; estas barreras generalmente son ecológicas en naturaleza. Dentro de una raza hay alto número de variedades.

La variedad se puede considerar como un grupo de individuos de una especie y raza con rasgos diferenciales más estrechos que aquellos manifestados por las razas. Las variedades agronómicas son producto de la selección humana que tiende a formar grupos de plantas similares con tendencia a su explotación económica. Las variedades se cruzan libremente y forman poblaciones diferenciales. El nombre común de una variedad es por su lugar de origen o son denominaciones autodescriptivas. (Wellhausen *et al.*, 1951)

Maíz criollo e híbrido

El término “criollo” (del portugués *crioulo*, *criar*) tiene varios significados y acepciones dependiendo del contexto. Históricamente se refiere a los descendientes de españoles nacidos en América, pero otra acepción es “autóctono, propio, distintivo de un país hispanoamericano” (según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española). En este sentido se maneja el término criollo. Pero el término criollo en sí no señala las diferencias que existen dentro del maíz, es decir no abarca el significado de una expresión como la de “variedad criolla”, la cual por lo regular es citada mayoritariamente en la literatura. El término “variedad criolla”, indica “población local nativa de maíz” (Ortega, 2003). Población local, según el Glosario de recursos Naturales de Gutiérrez *et al.* (1983) significa “grupo de individuos de la misma especie que se desarrollan lo bastante cerca unos de otros para efectuar cruces de hibridación e intercambiar genes” de esta forma aunque un agricultor mantenga varias poblaciones de maíz sembradas de forma contigua, no forman una sola población local siempre y cuando se mantenga cierto



grado de separación, como por ejemplo mediante la selección de las semillas. El término nativo se usa para diferenciar las poblaciones tradicionales de aquellas mantenidas por los agricultores pero generadas a partir de híbridos y variedades mejoradas (Ortega, 2003).

El vocablo “híbrido” hace referencia a maíces de variedades “mejoradas” mediante una serie de cruces experimentales de líneas de maíces auto-polinizadas o de polinización abierta, en donde la selección de los maíces se realiza principalmente por su rendimiento y por su resistencia a enfermedades e insectos, así como por la cantidad y el tipo de almidón, proteína, aceite y otras características como la dureza del endospermo y grosor del pericarpio, entre otros. Los primeros maíces “híbridos” se remontan a principios del siglo XX en los Estados Unidos y su impacto ha sido tal que en 1945 la superficie sembrada con maíz híbrido en los Estados Unidos correspondía al 90% (Darrah, 2003).

e) Clasificación del maíz

El maíz se puede clasificar desde el punto de vista botánico o taxonómico, comercial, especial y en función de su calidad.

Botánicamente pertenece a la familia de las Gramíneas (plantas anuales o perennes con polen libre), a la clase de las Monocotiledóneas (plantas con un solo cotiledón) y al grupo de las Fanerógamas (plantas con flores). Su género es *Zea* y la especie es *mays* (Bartolini, 1990).

Desde el punto de vista comercial o de compra-venta, el maíz se clasifica como:

Maíz Blanco, según la NMX-FF-034/1-SCFI-2002 es aquel que presenta un mínimo de 98% de granos blancos con un mínimo de 2% de otras variedades de granos claros (amarillos, cremosos, pajizos, grisáceos o rosados) y un mínimo de 1% de granos oscuros (rojos, azules, marrones y negros), la suma de ambos no debe de rebasar el 2%.



Maíz amarillo. Según la NMX-FF-034/2-SCFI-2002 es aquel que contiene un mínimo de 95% de granos amarillos y un máximo de 5% de granos de otro color.

Desde el punto de vista estructural, la clasificación del maíz se basa en la calidad, cantidad y composición del endospermo, que están determinadas principalmente por variaciones en la organización y tipos de los gránulos de almidón, y se divide en:

Dentado. El cual se caracteriza por una depresión o “diente” en la corona de la semilla y posee endospermo córneo o duro a los lados y detrás del grano y la porción harinosa se encuentra en la zona central y la corona del grano. Se utiliza principalmente como alimento animal, materia prima industrial y alimentación humana.

Cristalino. Los granos son duros, lisos y contienen poco almidón suave.

Harinoso. No posee endospermo cristalino o córneo.

Dulce. Caracterizado por una apariencia translúcida y córnea cuando está inmaduro y por una condición vítrea cuando está seco y en donde la conversión del azúcar en almidón se retarda durante el proceso de desarrollo del endospermo. En los Estados Unidos se consume como vegetal fresco o en estado lechoso.

Palomero o reventón. Contiene un maíz cristalino muy duro y muy poco harinoso, además se emplea para consumo humano en botanas.

Maíz céreo. Su almidón es casi en su totalidad amilopectina. Su almidón se utiliza como estabilizante y espesante en panes, salsas, pasteles y aderezos de ensaladas, además de emplearse como adhesivo en la industria papelera.

Maíz de alta amilosa. Su almidón está compuesto de alrededor de un 50% de amilosa. Se usa en la industria textil, así como adhesivo en la manufactura de cartón corrugado.

La clasificación respecto a su calidad, en la cual se toma en cuenta su constitución física, química y genética del grano de maíz y principalmente de su endospermo es:



Harinoso. Endospermo de consistencia suave y de apariencia opaca.

Córneo. Endospermo de consistencia dura y apariencia traslúcida que contiene 1.5 o 2 % más de proteínas que el endospermo harinoso.

La diferencia estructural entre ambos endospermos tiene un significado importante en la molienda seca y húmeda del maíz, ya que la desintegración del córneo se dificulta y la del harinoso resulta sencilla. Además la proporción de cada uno influye en las propiedades funcionales de las harinas derivadas de los maíces (Llanos, 1984).

2. El maíz y su importancia

a) *impacto económico e industrial*

El maíz es el tercer cereal más sembrado en el mundo con 150 millones de hectáreas cultivadas, solo después del arroz y el trigo, con una producción mundial que supera los 600 millones de toneladas (MT). En América Latina la cosecha es apenas de unos 85 MT (Barkin, 2003; FAO, 2000). En el año 2001 la producción nacional fue de 18.6 MT, mientras que la importación de maíz fue de 6.1 MT (FAO, 2001). El consumo de maíz en México es de 23 MT y solo el 15% es maíz industrializado. En la tabla siguiente se observan los usos del maíz industrializado por los diferentes sectores:

Tabla 2. Uso industrializado del maíz por sectores

Pecuario	47%	Masa y Tortilla	2.5%
Almidonero	32.3%	Cerealero	1.9%
Diconsa	11.4%	Frituras y Botanas	0.3%
Harinero	3.7%		

Fuente: Canacintra y Secretaría de Economía (2001)



b) Usos tradicionales

Debido a su diversidad los maíces criollos tienen muchos usos y son la base de platillos para los cuales los mejorados no son aptos. Existen variedades que presentan ciertas características que le confieren calidad tortillera y aptos para ser nixtamalizados y preferibles para ciertos usos especiales y culinarios, muchos de estos usos son específicos para razas o maíces de ciertas regiones. La tabla siguiente da una muestra de la diversidad culinaria y de usos tradicionales que los maíces criollos presentan:

Tabla 3. Usos alimenticios tradicionales de los maíces criollos

Tortillas, tamales, palomitas, atoles, antojitos (quesadillas, sopes, gorditas, memelas), pinole, pozole, panecillos, huacholes, gorditas de horno, gorditas de la villa, totemoxtle, totopos, ponteduro, pozol, hominy, etc.

Fuente: Ortega, 2003.

c) Usos Industriales y principales procesamientos

El maíz tiene una amplia aplicación en el sector industrial (tabla 4). El maíz es aprovechado industrialmente mediante dos procesos que son, la molienda seca y la molienda húmeda. La molienda en húmedo separa los componentes del maíz utilizando agua y tiene como productos almidón puro, y el germen, del cual se extrae aceite y gluten. El gluten se utiliza en la elaboración de alimentos balanceados para animales. A partir del almidón se obtiene una serie de derivados que tienen múltiples aplicaciones en la industria (tabla 4).



Tabla 4. Derivados del almidón de maíz

DERIVADOS DEL ALMIDÓN DE MAÍZ
glucosa, jarabes, jarabes de alta fructosa, color caramelo, maltodextrinas, dextrosa, sorbitol, etanol, plásticos biodegradables, papel y tela, abrasivos, adhesivos, baterías, agentes ligantes, cartón, combustible para calderas, colorantes, procesos de fermentación pegamentos, plásticos, etc.

Fuente: www.iowacorn.org

En la molienda en seco se remueve el embrión del grano y el pericarpio para obtener harina y sémola de maíz (endospermo). La sémola se utiliza en la elaboración de hojuelas de maíz. Otro proceso de importancia es la industria de la nixtamalización que obtiene masa para la elaboración de tortillas, botanas y frituras. En la tabla 5 se resumen estas aplicaciones.

Tabla 5. Principales procesamientos del maíz

MOLIENDA HÚMEDA	MOLIENDA SECA
- Almidón - Germen: Gluten y Aceite	- Germen: aceite y gluten - Endospermo: Harina, botanas, cereales de desayuno, cerveza - Pericarpio y Fibra
NIXTAMALIZACIÓN	
- Masa: tortilla, botanas y frituras	

Fuente: www.iowacorn.org



3. El maíz y su composición

Las propiedades del maíz son resultado directo de sus componentes y la forma en que estos interactúan y con otras sustancias o compuestos bajo diferentes condiciones según el procesamiento al que sea sometido.

a) Composición del Grano

La planta de maíz produce mazorcas, las cuales están conformadas por hileras de lo que comercialmente se conoce como “granos”. Botánicamente al grano se le llama “cariósipide” y para un uso agrícola se le nombra “semilla”. El grano de maíz se compone de las siguientes partes:

Pericarpio. Cubierta del fruto, de origen materno, también se conoce como hollejo o cáscara.

Aleurona. Capa de células del endospermo de naturaleza proteínica.

Endospermo. Tejido de reserva de la semilla que alimenta al embrión durante la germinación. Es la parte de mayor volumen. Dos regiones bien diferenciadas hay en el endospermo, suave o harinoso y endospermo duro o vítreo.

Escutelo o cotiledón. Parte del embrión.

Embrión o germen. Planta en miniatura con la estructura para originar una nueva planta, al germinar la semilla.

Capa terminal o piloriza. Parte que se une al olote, con una estructura esponjosa, adaptada para la rápida absorción de humedad. Entre esta capa y la base del germen se encuentra un tejido negro conocido como capa hilar, la cual funciona como un mecanismo saliente durante la maduración del grano (Reyes, 1990).



Un grano de maíz se observa en el siguiente esquema:

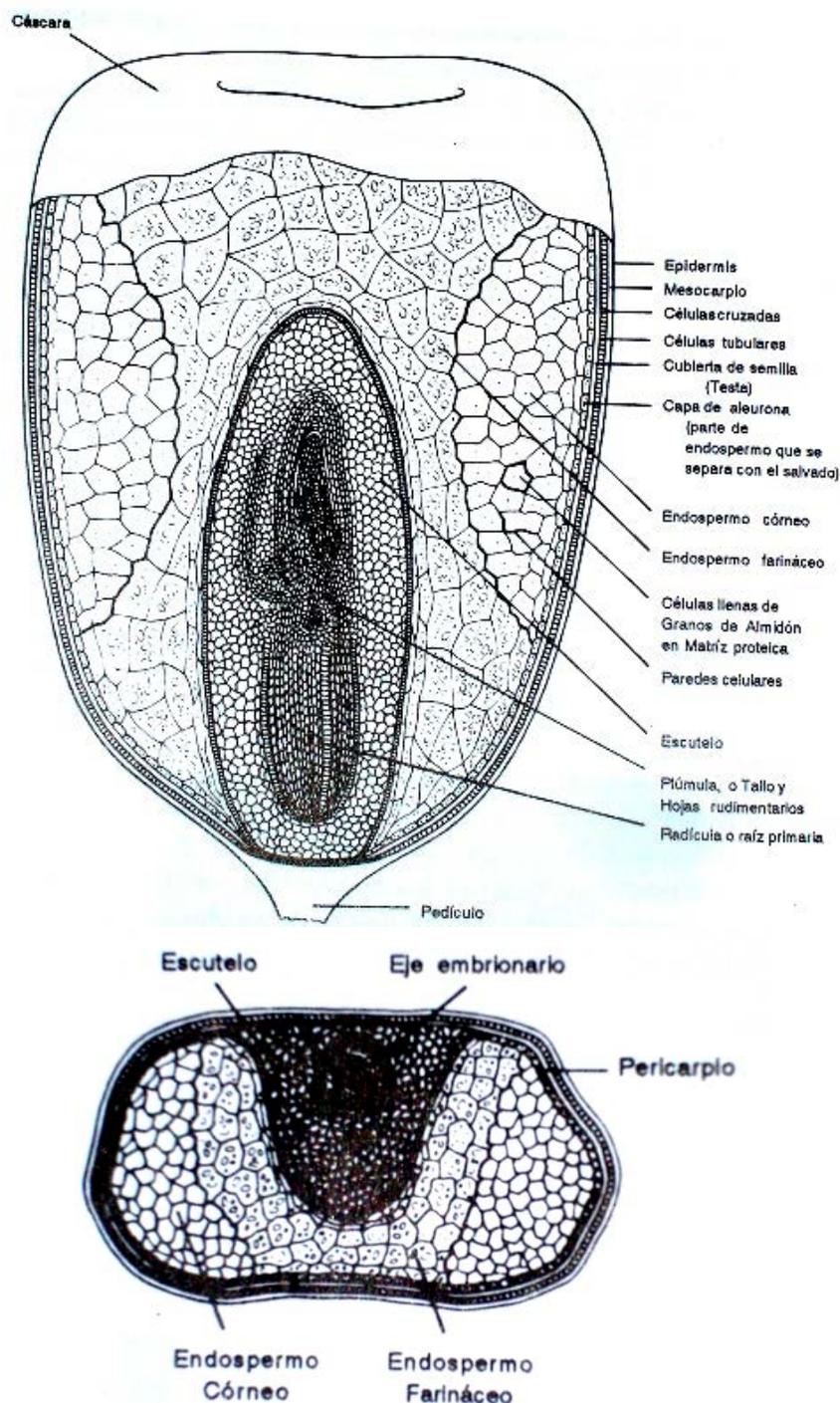


Figura 3. Esquema del grano de Maíz. Corte longitudinal y transversal del grano (Hoseney, 1991)



b) Composición proximal del maíz

El maíz está compuesto por una gran cantidad de sustancias diferentes y en proporciones muy variadas. La composición del grano varía en relación al estadio, raza, variedad, tecnología de cultivo. Clima, parte del grano que se analice, técnicas y métodos de análisis; aunque de manera general se establece que el endospermo conforma el 82% del grano, el pericarpio el 6% y el embrión el 12% restante (Reyes, 1990).

La composición promedio de un grano entero de maíz y de sus principales estructuras anatómicas se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Composición del grano y de las estructuras anatómicas

Componente	Grano Entero (%)	Pericarpio (%)	Endospermo (%)	Germen (%)
Humedad	16.7	ND	ND	ND
Almidón	71.5	7.3	87.6	8.3
Proteína (Nx6.25)	9.5	3.7	8.0	18.4
Extracto etéreo	4.8	1.0	0.8	33.2
Fibra cruda	2.3	86.7	2.7	8.8
Azúcares totales	2.6	0.3	0.6	10.8
Cenizas	1.3	0.8	0.3	10.5

ND: Datos No disponibles

Fuente: Watson A. y Ramstad E. Chemistry and Technology. Am. Assoc. Cereal Chem. St. Paul, Minnesota, USA. 1987. P. 605.

En el endospermo se encuentra la mayor cantidad de almidón, y junto con el endospermo, contiene proteínas del tipo albúminas, globulinas, prolaminas (zeínas) y gluteninas (gluten de maíz) junto con escasas cantidades de grasa, cenizas y azúcares. El germen, además,



contiene la mayor cantidad de aceite, así como almidón, cenizas y azúcares. Por último, el pericarpio contiene almidón, grasa, cenizas (Sales de calcio, magnesio, fósforo, aluminio, hierro, sodio, potasio y cloro), azúcares y fibra (carbohidratos como celulosa y hemicelulosa).

En general, el maíz tiene alto valor nutritivo como fuente de energía, por su alto contenido de carbohidratos, pero no posee ni la cantidad ni la calidad suficiente de proteínas pues es deficiente en lisina y triptófano, además de ser insuficiente en vitaminas y minerales.

Un alto consumo de maíz predispone a la pelagra, enfermedad consistente en la inflamación superficial de la piel y trastornos digestivos y nerviosos, sin embargo, esta deficiencia puede ser contrarrestada mediante el consumo de leguminosas como frijol, lenteja, soya, entre otras, o bien, de alimentos elaborados con maíz nixtamalizado, proceso alcalino que hace que la niacina aumente importantemente su biodisponibilidad al ser liberada de su forma original como niacitina y niacinógeno (Katz *et al.* 1974). Además los productos nixtamalizados tienen un mejor índice leucina-isoleucina que el maíz en su forma original.

4. El Almidón y sus características

a) Estructura del gránulo de almidón

El almidón está presente en la naturaleza en forma de pequeñas partículas discretas mejor conocidas como gránulos, localizadas dentro de las células del endospermo del grano de maíz. El almidón es un producto de la fotosíntesis y su principal función es almacenaje de energía que satisfaga las necesidades de las semillas al germinar. El gránulo se compone de capas estratificadas de almidón que se van formando alrededor de un núcleo llamado *hilum*. Conforme esas capas se van desarrollando, los gránulos van



adquiriendo la forma y el tamaño característico de la planta. Los gránulos característicos del maíz miden entre 5 y 25 μm y son de forma poligonal y/o redonda (BeMiller, 1996; Corn Refiners Association, 1983).

El gránulo de almidón está altamente estructurado y no solo es una aglomeración de polímeros de glucosa, como se observa en la birrefringencia o típica cruz de malta que muestran al ser expuestos los gránulos bajo microscopio de luz polarizada. Sus propiedades son altamente dependientes de la forma que toman las unidades de glucosa de la molécula de almidón por sí misma. Los gránulos de almidón se componen exclusivamente de moléculas de amilosa y de amilopectina, que como se ha dicho se van acomodando radialmente. Estas moléculas conforman regiones cristalinas (pobres en contenido de agua) y no cristalinas (ricas en contenido de agua) en capas alternantes, por lo que se reconoce que el gránulo de almidón es una estructura semicristalina (Belitz, 2001). Aproximadamente el 30% de la masa del almidón se considera cristalino, mientras que el restante 70% amorfo. Las zonas cristalinas están formadas principalmente por agrupaciones de las cadenas ramificadas de la amilopectina empacadas en dobles hélices, aunque la amilosa también puede tomar parte. Estas zonas cristalinas comprenden las capas densas de los gránulos de almidón que se alternan con las capas amorfas menos densas donde se localiza principalmente la amilosa (Figura 4 y 5).

Debido a que la cristalinidad se debe a las cadenas de amilopectina, el almidón de maíz céreo tiene casi la misma cantidad de cristalinidad como los almidones de variedades normales. Debido a esto la mayoría de las moléculas de amilosa pueden difundir hacia el exterior del gránulo cuando se hincha, aunque algunas otras moléculas de amilosa se encuentran entre las moléculas de amilopectina formando dobles hélices y por lo tanto participando en las zonas cristalinas (BeMiller, 1996; Belitz, 2004). El estado cristalino del



almidón depende de su contenido acuoso y puede ser destruido por medios mecánicos, como la molienda con bolas (Hoseney, 1991).

Todos los almidones contienen pequeñas cantidades de minerales, lípidos y proteínas. Solo los almidones de cereales contienen lípidos endógenos en los gránulos. Estos lípidos internos son principalmente ácidos grasos libres y lisofosfolípidos. El contenido de lípidos varía conforme cambia el contenido de amilosa. El contenido de lípidos en la harina se puede clasificar según su solubilidad en solventes como lípidos ligados y no ligados al almidón. La fracción no ligada contiene la mayor parte de los lípidos no polares.

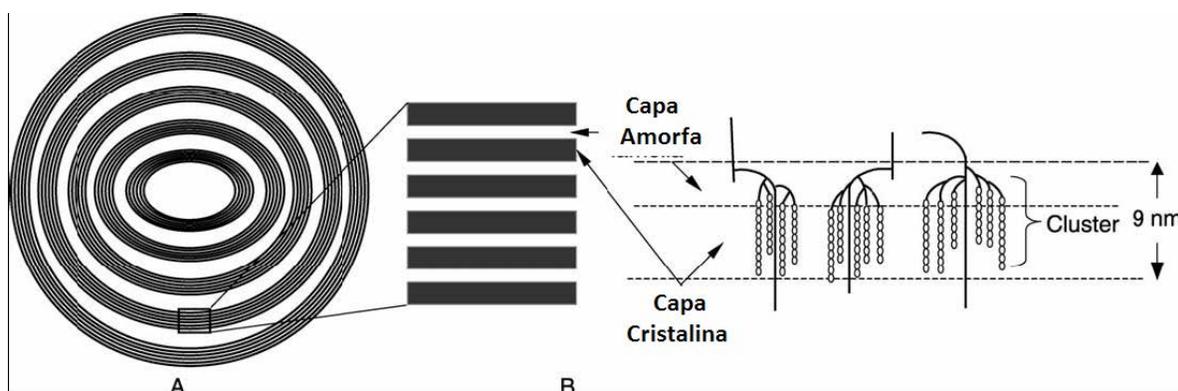


Figura 4. Diagrama representando la estructura de capas del almidón del gránulo. (A) Barras de capas cristalinas separadas por anillos de secciones amorfas. (B) Vista ampliada de regiones cristalinas y amorfas donde se observan las dobles hélices formadas por cadenas adyacentes de amilopectina que toman parte en la sección cristalina, mientras que las zonas de ramificación en la región amorfa (Tester, 2003)

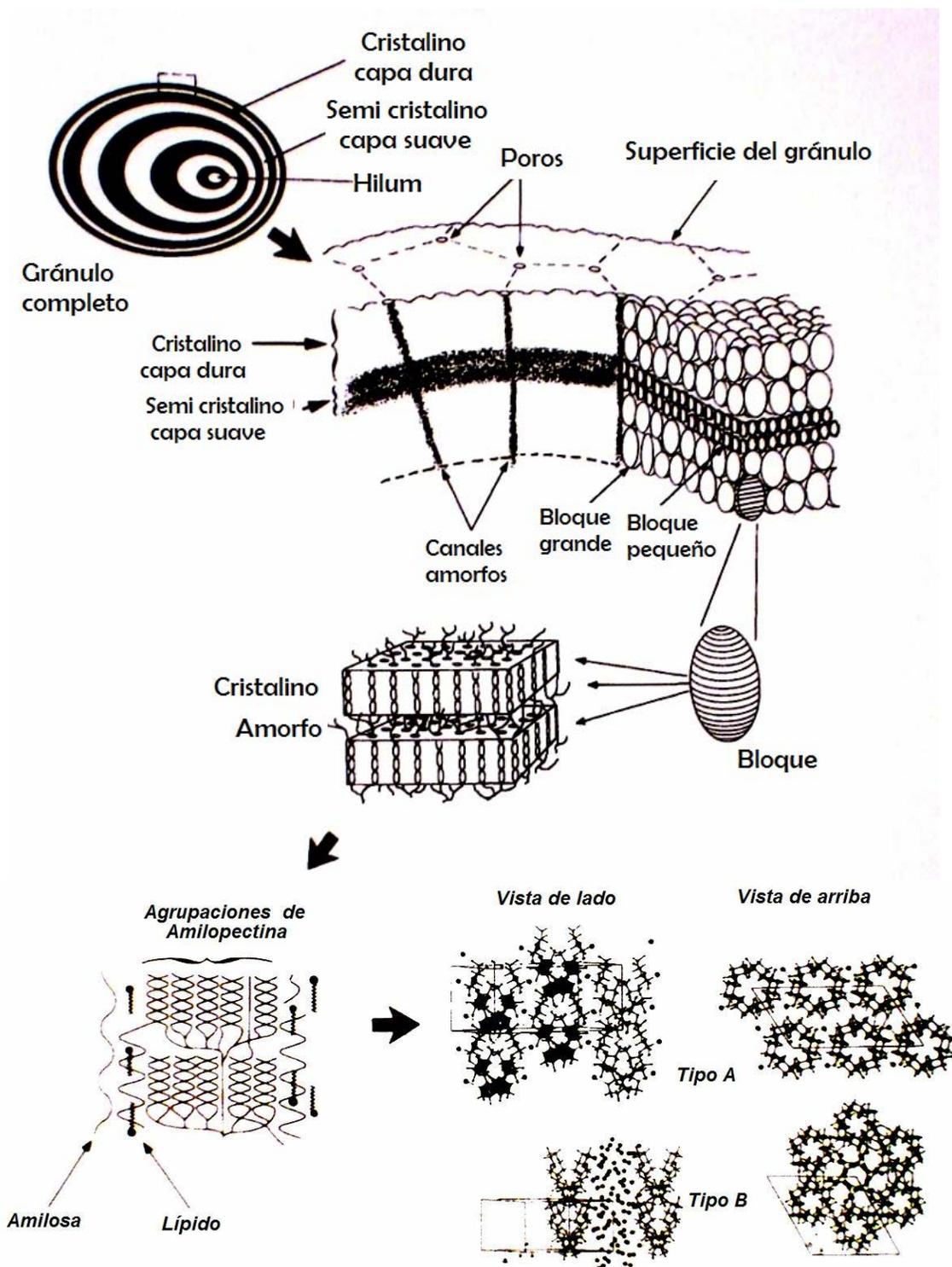


Figura 5. Diagrama de la estructura del gránulo de almidón a varios niveles. En el menor nivel se observan las capas del gránulo y en el menor las estructuras de los cristales del almidón. (Gallant *et al.*, 1997)



Químicamente el almidón es una mezcla de dos polímeros formados por unidades de anhidroglucosa ($C_6H_{10}O_5$); amilosa, esencialmente lineal y amilopectina, básicamente ramificada (figura 6 y 7). Este compuesto polihidroxílico es un homopolímero formado por unidades de anhidroglucosa unidas mediante enlaces α -glucosídico que consisten en la unión química entre un grupo aldehído de un eslabón con un grupo hidroxilo del eslabón siguiente a través de enlaces tipo hemiacetal. Concurren 2 formas de enlace, el α -1,4 que produce moléculas de almidón lineales (amilosa) y el α -1,6 que sirve como el punto de ramificación en la amilopectina (Figura 7). La proporción de amilosa y amilopectina esta genéticamente determinado entre las diferentes especies y dentro de ellas mismas (Corn Refiners Association, 1983).

Tabla 7. Propiedades de amilosa y amilopectina

PROPIEDAD	AMILOSA	AMILOPECTINA
Peso molecular	$1-2 \times 10^5$	$> 2 \times 10^7$
Grado de polimerización	990	7200
Enlaces glucosídicos	Principalmente α -D-(1 \rightarrow 4)	α -D-(1 \rightarrow 4) y α -D-(1 \rightarrow 6)
Forma molecular	Esencialmente lineal	Muy ramificado
Susceptibilidad a la retrogradación	Mucha	Poca
Lamda máxima de los complejos con yodo	644 nm	554 nm
Afinidad a Yodo	20.1 g/100 g	1.1 g/100 g

Todos son valores para almidón comercial de híbrido amarillo
Fuente: White, 2003.

b) Estructura de la Amilosa

Como se ha hecho mención anteriormente, la amilosa es una de las dos moléculas que conforman el almidón; es un polímero esencialmente lineal aunque muchas moléculas tienen unas cuantas ramificaciones α -1,6, quizás 1 de cada 180-320 unidades, es decir un



0.3-0.5% del total de los enlaces. Estos pueden ser tanto muy largos como muy cortos y se encuentran muy separados uno del otro por lo que afectan poco en sus propiedades manteniéndose esencialmente como los de una molécula lineal (BeMiller, 1996). Su peso molecular es de aproximadamente 10^6 . En las figuras 6 y 7 se aprecia una imagen de la amilosa y en la tabla 7 se enlistan algunas de sus características más relevantes. Las cadenas de amilosa toman una forma de espiral o hélice que gira hacia la derecha. Al interior de la molécula se localizan únicamente moléculas de hidrógeno (ambiente lipofílico), mientras que los grupos hidroxilo están en el exterior de la espiral. (BeMiller, 1996). El interior lipofílico de la amilosa le permite formar complejos con porciones hidrofóbicas lineales de moléculas que sean capaces de acomodarse dentro, como por ejemplo con el Yodo (I_3^-), alcoholes o ácidos orgánicos.

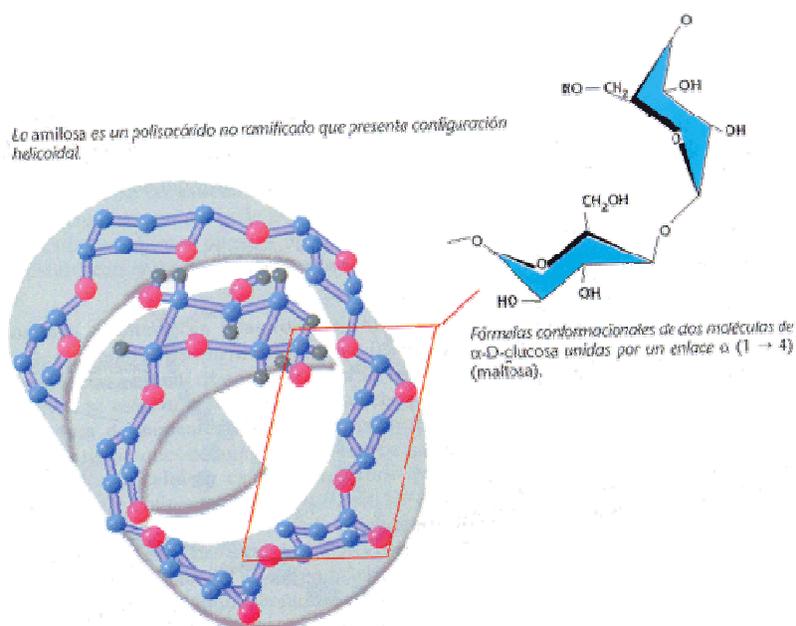


Figura 6. Estructura de la amilosa

Los lípidos polares pueden afectar las propiedades del almidón de varias formas:

- afectando la gelatinización (pérdida de birrefringencia e hinchamiento del gránulo, además de afectar el lixiviado de amilosa e incremento de viscosidad durante el cocinado)



- afectando el comportamiento reológico de las soluciones de almidón
- inhibiendo la recristalización de moléculas de almidón durante la retrogradación

La naturaleza lineal y de gran longitud de la amilosa, es también responsable de la fuerte tendencia a asociarse consigo misma y precipitarse de la solución. A esta recristalización se le conoce como retrogradación. Permanecerá en disolución si se mantiene un pH alto (por ejemplo KOH, 1N), se inducen de esta manera, cargas positivas en los grupos OH, y estas cargas en cadenas adyacentes establecen su repulsión recíproca (Hoseney, 1991; BeMiller, 1996).

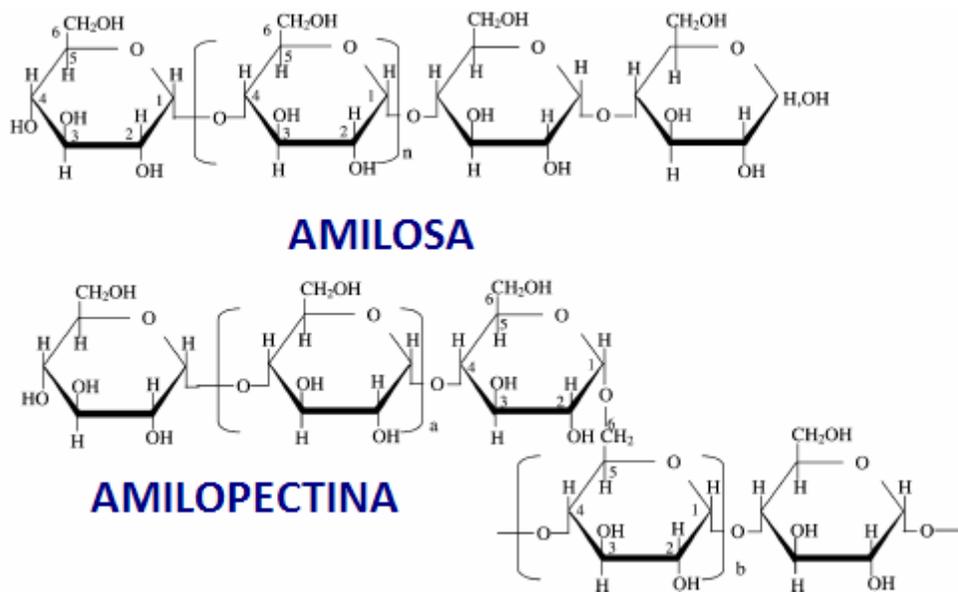


Figura 7. Representación de la amilosa y la amilopectina. Adaptado de Tester, 2004

c) Estructura de la Amilopectina

La molécula de amilopectina es muy larga y altamente ramificada, su peso molecular está entre 10^7 y 5×10^8 , haciendo que la amilopectina sea una de las moléculas más grandes de la naturaleza si no es que las más grande, mientras que la amilopectina de maíz ha



sido estimado que pesa más de 2×10^6 . Contiene enlaces (1-4) y (1-6)-alfa-D-glucosídicos (tabla 7). La amilopectina consiste en una cadena llamada cadena C, la cual contiene el único grupo reductor, las cadenas B_1 , B_2 y B_3 se unen por medio de sus extremos reductores a la cadena C, y las cadenas B contienen varias cadenas A unidas de la misma manera (figura 8). Las ramificaciones forman dobles hélices y se agrupan entre ellas y son las que forman parte de las zonas cristalinas. La longitud de cadena promedio de las ramas de la amilopectina de maíz una vez que ha sido desramificada con isoamilasa es de 21.4 y su grado de polimerización, es decir el número total promedio de residuos de glucosa es de 7200 (BeMiller, 1996; White, 2003). Como ya se dijo, generalmente, la mayor contribución a la estructura cristalina de los gránulos de almidón proviene de la amilopectina ya que sus ramas forman dobles hélices. Al contrario de la amilosa no tiene casi tendencia a la retrogradación, ni presenta envejecimiento, ni forma geles (Belitz, 2004).

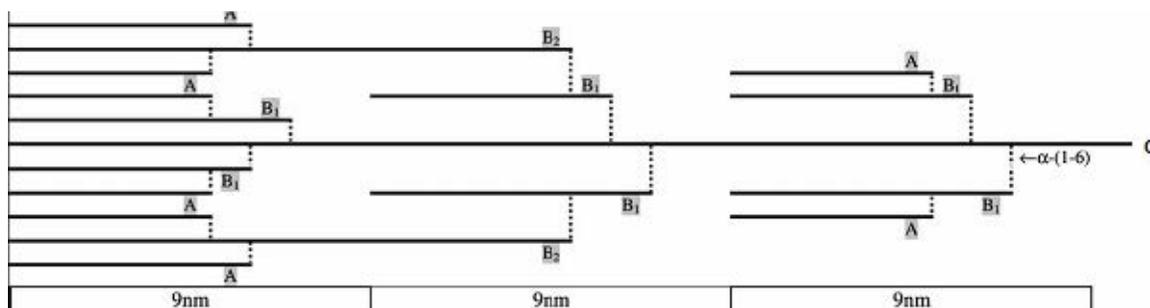


Figura 8. Representación esquemática de la amilopectina indicando su patrón de ramificación (Tester, 2004)

d) Métodos de cuantificación de la relación amilosa/amilopectina

Los métodos comunes de determinación de amilosa y amilopectina en almidones son por cuantificación potenciométrica, amperométrica o colorimétrica de la capacidad de unión a



yodo (I_3^-), es decir de la formación de complejos amilosa-yodo. Sin embargo estos métodos están sujetos a incertidumbres debido a que también se forman complejos amilopectina-yodo con las cadenas largas de la amilopectina, lo cual reduce la concentración de yodo libre medido; además los complejos entre el yodo y la amilopectina pueden también absorber a longitudes de onda similares a los complejos amilosa-Yodo. Todo esto conduce a una sobreestimación de la amilosa, requiriendo correcciones con el uso de curvas de calibración, las cuales a su vez presentan inexactitudes al emplear únicamente amilosa debido a que no se toma en cuenta la absorción de los complejos amilopectina-yodo, aparte de que la capacidad de unión de yodo del almidón usado en la curva de calibración varía según la fuente del almidón.

Existen otros métodos que evitan esas inexactitudes en la cuantificación de la relación amilosa/amilopectina, como los basados en la formación específica de complejos entre la amilopectina con la lectina Conavalina A (Con A). El fundamento que subyace a tal método, es la formación específica de complejos entre la Con A y los múltiples grupos no reductores finales presentes únicamente en polisacáridos ramificados de α -D-Glucopiranosil (como la amilopectina) ó α -D-Manopiranosil, resultando la formación de un precipitado bajo condiciones definidas de temperatura, pH y fuerza iónica. Debido a esto, la Con A compleja efectivamente y de forma específica únicamente la amilopectina del almidón y no la molécula de amilosa, que es básicamente lineal y tiene sólo un grupo no reductor. Esto hace que el método no esté sujeto a incertidumbres como en los antes mencionados. Además, existe un kit disponible comercialmente desarrollado por la empresa Megazyme Ireland, que es fácilmente adquirible y puede ser usado directamente sobre harinas. Algunas características de los métodos usados para cuantificar la relación amilosa/amilopectina se ven en la tabla 8.



Tabla 8. Métodos para determinación de la relación amilosa/amilopectina

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS
Espectrofotometría y Colorimetría	Complejos Amilopectina-Yodo absorben a misma λ_{\max} que complejos Amilosa-Yodo
Amperometría y Potenciometría	Formación de complejos Amilopectina-Yodo reducen concentración de yodo libre. Además, λ_{\max} de complejos Amilosa-Yodo aumenta al crecer el grado de polimerización.
Cromatografía exclusión por tamaño	Necesario desramificación enzimática de amilopectina. Laborioso y poco práctico para muchas muestras. Útil en estudios finos.
Transmitancia IR cercano	Muy rápido. Necesario método referencia para calibrar
Calorimetría Diferencial	Muy rápido. Necesario método referencia para calibrar
<u>Complejos Amilopectina Concanavalina A</u>	Específico, disponible comercialmente (Megazyme, Ireland), rápido, adaptable a muchas muestras, análisis directo en harina.

Fuente: Gibson *et al.*, 1997

5. El maíz y sus propiedades fisicoquímicas

El almidón es el polisacárido más ampliamente distribuido en la naturaleza y es el componente principal de los cereales. Es único en sus propiedades físicas, químicas y nutricionales respecto a todos los demás carbohidratos. Está presente en todas las plantas fotosintéticas sirviendo como compuesto de reserva que satisface necesidades energéticas para su desarrollo. El almidón prevé a los humanos del 70-80% de las calorías totales que se consumen en la dieta, ésto debido a la facilidad con que se



digieren. El almidón es un ingrediente necesario e imprescindible en la elaboración de muchos alimentos debido a sus propiedades funcionales (BeMiller, 1996).

a) Gelatinización e Hinchamiento

Como se ha dicho, los gránulos de almidón presentes después de la extracción son parcialmente cristalinos e insolubles en agua. Absorben un 30% de su peso de agua a temperatura ambiente, proceso que es reversible. Sin embargo importantes e irreversibles cambios en su estructura y sus propiedades suceden cuando se les aplica calor en presencia de agua; este proceso se le conoce como gelatinización. La gelatinización es el colapso del orden molecular dentro del gránulo de almidón, y se manifiesta en cambios irreversibles en sus propiedades tales como hinchamiento granular, fusión de los cristales nativos, pérdida de birrefringencia y solubilización por parte del almidón. Esto sucede por que la energía cinética que el calor incorpora al gránulo rompe los puentes de hidrógeno existentes permitiendo la entrada de agua hacia el interior del gránulo, lixiviándose la amilosa (junto con amilopectina) e hidratándose considerablemente la amilopectina, lo cual provoca un aumento de viscosidad, pérdida de la cristalinidad del gránulo que se nota en la pérdida de la birrefringencia. La gelatinización ocurre en un intervalo corto de temperaturas; el intervalo promedio para el maíz es de 61 a 72°C (White, 2003). Algunas diferencias entre el hinchamiento de los gránulos de almidones de maíz han sido asociado principalmente a diferencias en la estructura de la amilopectina (Jane, 1999; Tester, 1990).

Aproximadamente cinco partes de almidón en peso pueden inmovilizar 95 partes de agua, por lo que los gránulos pueden hincharse de gran manera. Los gránulos hinchados pueden desintegrarse rápidamente por agitación excesiva generando una caída en la



viscosidad de la solución de almidón. En la figura 9 se puede observar como va cambiando la forma de los gránulos conforme se van gelatinizando.

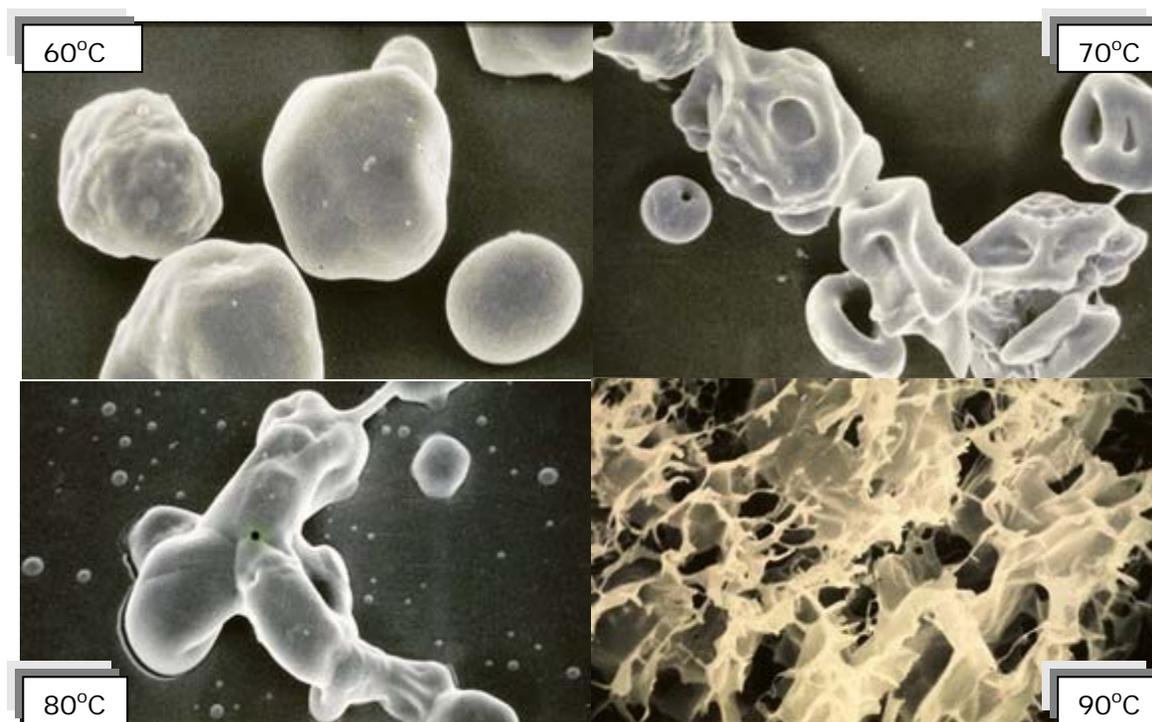


Figura 9. Proceso de hinchamiento de los gránulos de almidón durante su calentamiento en agua visto a diferentes temperaturas (60, 70, 80 y 90°C).

Fuente: food.oregonstate.edu/images/starch

Los componentes y condiciones afectan la gelatinización de diversas formas; los azúcares tienden a competir con el almidón por el agua, disminuyendo la cantidad de gelatinización que pueda ocurrir. El $\text{pH} < 4$ reduce la adherencia de una pasta de almidón caliente y su firmeza al ser enfriada debido a la hidrólisis de las moléculas de almidón en los gránulos hinchados. A $\text{pH} > 10$ el hinchamiento de los gránulos es aumentado grandemente (White, 2003, Hamaker, 1997). Los lípidos, y en especial los componentes grasos polares, tienen por su parte efectos de gran interés. Los triacilglicérols disminuyen la temperatura de la máxima viscosidad, mientras que diacilglicérols y monoacilglicérols en concentraciones



menores del 1% pueden formar complejos con la amilosa en el gránulo o con las ramificaciones largas de ciertas moléculas de amilopectina, las cuales forman estructuras helicoidales alrededor de la molécula lipídica. Estos complejos de inclusión resisten el lixiviado del gránulo e impiden la entrada de agua hacia el gránulo alterando las propiedades funcionales del almidón. Para que se formen estos complejos de inclusión se requiere que interaccionen la amilosa/ cadenas largas de amilopectina por algún tiempo y alcanzar cierta temperatura. De manera general, complejos con componentes grasos de cadena larga disminuyen el hinchamiento, la solubilización, el endurecimiento de los productos y la temperatura de formación del gel y su fuerza; pero incrementan la temperatura de gelatinización y la temperatura de máxima viscosidad (White, 2003).

b) Métodos para medir la gelatinización

La gelatinización puede ser estudiada usando métodos físicos, químicos y bioquímicos como, microscopía electrónica y de luz, transmisión de luz, viscometría, determinaciones de solubilidad e hinchamiento, difracción de rayos X, calorimetría diferencia de barrido, entre otros. Pero debido a que la gelatinización es un proceso endotérmico, la calorimetría diferencial de barrido (CDB), la cual mide tanto las temperaturas como la entalpía de gelatinización, es ampliamente usada y aceptada. La CDB fue reportada por primera vez en la medición de las propiedades de gelatinización de almidones en 1971 por Stevens & Elton. Este método requiere una pequeña cantidad de almidón (1 a 4 mg en base seca) y una cantidad de agua preseleccionada en una cápsula de aluminio. El almidón junto con el agua son calentados en la cápsula a cierta velocidad junto a un material de referencia, se mide el flujo de calor endotérmico y son detectadas las temperatura de inicio, de pico y de finalización de la gelatinización, así como su entalpía (White, 2003).



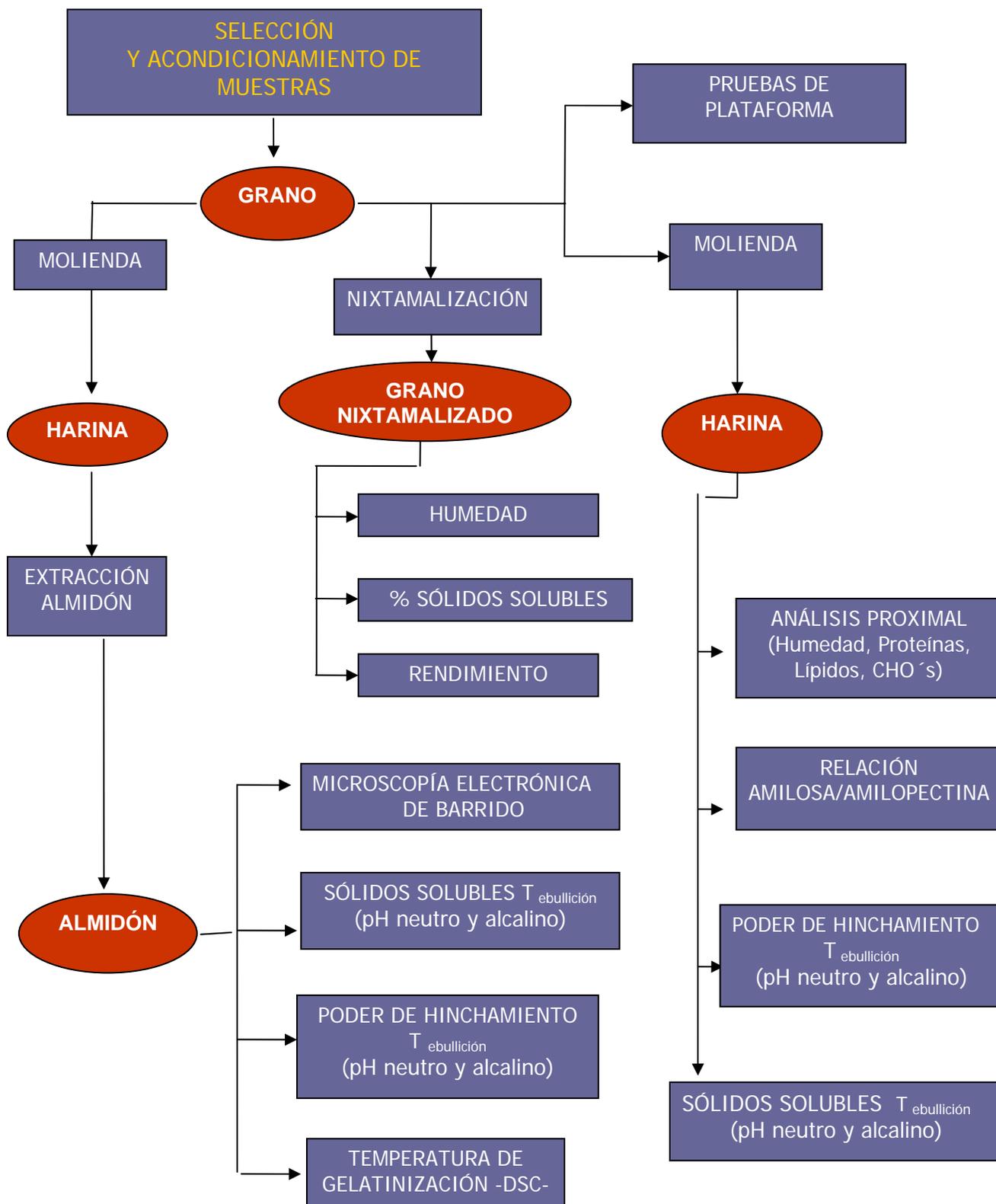
Los cambios que se dan durante la determinación de la gelatinización con la CDB están basados en que el agua hidrata y actúa como un plastificante, el cual provoca un cambio de una fase *vítrea* a una *de goma* en la zona amorfa del gránulo y la fusión de los cristalitos de las agrupaciones de las dobles hélices de las ramificaciones de amilopectina, en donde se mide la absorción de energía de estos dos fenómenos, aunque el primero es más notable. Así mismo, a una temperatura mucho mayor (85-120°C) ocurre la fusión de los complejos de amilosa-lípidos, el cual se detecta también por CDB; ese proceso está ausente en almidones de maíz céreo (BeMiller, 1996).

c) Retrogradación

La retrogradación del almidón es un proceso el cual ocurre cuando las moléculas del almidón gelatinizado comienzan a reasociarse en una estructura ordenada. En un principio, dos o más cadenas de almidón pueden formar un punto simple de unión a partir del cual se puede desarrollar hacia una mayor cantidad de regiones ordenadas. En una solución de almidón de maíz enfriada, las moléculas de amilosa tienden a asociarse, se van juntando unas con otras formando una red cristalina. Las moléculas de amilosa más cortas tienen menos tendencia a recristalizar. Se han producido almidones modificados químicamente a los que se les ha incorporado enlaces cruzados usando por ejemplo grupos fosfatos para inhibirla retrogradación ya que los almidones provenientes de maíces normales y de alta amilosa exhiben una alta tendencia a la retrogradación (Be Miller, 1996).



II. MATERIALES Y MÉTODOS





1. Pruebas de Plataforma

Fueron recolectadas 6 muestras de distintas variedades de maíces criollos en diversos mercados dentro de la zona metropolitana del DF. A la par se analizó una muestra compuesta de diversas variedades maíces híbridos que serviría como referencia, esto con la finalidad de notar las posibles diferencias y semejanzas entre los parámetros determinados experimentalmente de los maíces criollos respecto a la de los híbridos. La muestra de maíces híbridos se formó al mezclar en proporciones iguales varios maíces híbridos donados por la empresa comercializadora de maíces PORTIMEX S.A de C.V.

Los maíces se limpiaron y acondicionaron según lo establece la NMX-FF-034/1-2002 PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS PARA CONSUMO HUMANO – CEREALES – PARTE I: MAÍZ BLANCO PARA PROCESO ALCALINO PARA TORTILLAS DE MAÍZ Y PRODUCTOS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO- ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA. Posteriormente se realizaron las siguientes pruebas físicas que corresponden a las pruebas de plataforma más comunes para cereal a granel de maíz:

- Peso Hectolítrico
- Índice de Flotación
- Peso de 1000 granos

a) *Peso Hectolítrico.* Basado en el método 81-10 *Weight Per Bushel* (AACC, 1983). La prueba es un indicador de la densidad del grano al relacionar la masa con el contenido en un volumen de 1L.

En un recipiente de aproximadamente 1L se dejó caer el grano limpio libremente de una altura de 20 cm hasta que se desbordó. Se ralizó con regla con 3 movimientos en zigzag, entonces se pesó el grano. Se reportó con un decimal el peso en Kg que corresponde a 1HL (100L).



b) Índice de Flotación. Según la norma NMX-FF-034/1-2002. El índice de flotación se relaciona con la dureza del grano y esta a su vez con el tipo de almidón. El almidón de naturaleza cornea está vinculado con los granos más densos o duros y el endospermo harinoso en los más blandos y ligeros. Los que más flotan son los más duros y los que no son los más harinosos.

Se agregaron 100 granos a la solución de NaNO_3 ($\rho = 1.250 \pm 0.001$ g/ml) previamente preparada. Se separaron los granos con agitador de vidrio, se agitaron y se esperó 1 minuto para tomar la lectura. Se realizó por triplicado. El número de granos que ascendieron a la superficie se usa como índice de flotación. Se realizó por triplicado.

Para determinar el tipo de grano se hizo uso de la siguiente escala de granos flotantes

0 – 12 Muy Duro

13 – 37 Duros

38 – 62 Intermedios

63 – 87 Suaves

88 – 100 Muy suaves

c) Peso de 1000 granos. Según Rangel-Meza *et al.*, 2004. La densidad de los granos se relaciona con el tipo, tamaño y forma del grano, con el endospermo y su composición, con la madurez, edad y cambios en el almacenamiento y el desempeño del grano en cualquier proceso. Se escogieron al azar 100 granos y se pesaron. El resultado se multiplicó por 10 para obtener el peso final.



2. Análisis Proximal

Contar con la composición proximal de las muestras de harinas de los maíces es un requisito imprescindible para la realización de varios cálculos como en las determinaciones de la relación amilosa/amilopectina, entre otros. Además sirve para poder definir el efecto de sus composiciones sobre sus propiedades fisicoquímicas. Las pruebas realizadas fueron:

- ✓ Humedad
- ✓ Cenizas
- ✓ Proteínas
- ✓ Grasa
- ✓ Almidón

a) Molienda. En esta etapa los granos de maíz son transformados a harinas con un tamaño de partícula < 0.5 mm (malla 40). El contar con las muestras de maíz en forma de harina es un requisito obligatorio para poder realizar adecuadamente el análisis proximal así como otras determinaciones fisicoquímicas como la determinación de la relación amilosa/amilopectina y el poder de hinchamiento.

En la molienda se rompe el pericarpio del grano para liberar el endospermo y se reduce el tamaño de partícula del contenido homogéneamente hasta obtener cierto tamaño de partícula, en este caso < 0.5 mm (pasar malla 40), de 1 kg aproximadamente de grano limpio. Se agregó el grano limpio a la tolva alimentadora del molino CeCoCo (Tokio, Japón). Fueron molidos en 3 etapas, se recogieron las muestras molidas en bolsas de plástico de cierre hermético. Enseguida se molieron las harinas previamente obtenidas en porciones de 50 g en un molino de café marca Braun Toast Master modelo 1112 hasta que se obtuvo toda la harina con tamaño de partícula < 0.5 mm. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico con cierre hermético de 250 g a temperatura de 4°C.



b) Humedad

Se realizó con base en la metodología oficial 925.10 *Solids (total) and moisture in flour. Air oven method* (AOAC, 2000). En el método las muestras se secan a una temperatura superior a la del punto de ebullición del agua, lo que genera que las muestras pierdan el agua que contienen.

En un pesafiltro a peso constante, calentado previamente a 130°C, con aproximadamente 2g de harina fueron colocados dentro de un horno a 130°C por 1 hora. El pesafiltro se sacó y se colocó en desecador y fue pesado hasta que alcanzó la temperatura ambiente. La humedad se reportó en porcentaje por diferencia de pesos.

c) Cenizas

Se utilizó la metodología 923.03 *Ash of Flour* (AOAC, 2000). La determinación se basa en la cuantificación gravimétrica del material inorgánico (cenizas) obtenido después de incinerar (eliminación de la materia orgánica) la muestra de maíz. La incineración se realiza en 2 etapas, en la primera la muestra se somete a ignición en una parrilla para empezar a calcinarla, después se continúa calcinando en una mufla a una temperatura entre 500 y 600°C hasta obtener unas cenizas de color blanco-grisáceo. El peso de las cenizas se obtiene por diferencia, reportándose como porcentaje.

d) Proteínas

Se siguió el método 979.09 *Protein in Grain: Kjeldahl Method* (AOAC, 2000). El método también es conocido como método de Kjeldhal.

El método de Kjeldhal se divide en tres etapas. La primera etapa se le conoce como *digestión*, debido a que la materia orgánica (incluyendo las proteínas) se oxida drásticamente con ácido sulfúrico y una pastilla de catalizadores por varias horas, posteriormente se realiza la *destilación* del *digerido* con una solución de Hidróxido de Sodio con el fin de desprender el amoniaco derivado de las proteínas en forma de gas. A



continuación, en la fase conocida como *titulación*, este amoniaco se recupera en un matraz que contiene una solución de ácido bórico + indicadores y se titula con HCl al 0.1%. Se reporta en porcentaje como contenido de nitrógeno (N) total, ya que se infiere que el nitrógeno que se cuantificó proviene de la totalidad de las proteínas de la muestra. El factor de conversión para proteína de maíz es de 6.25.

e) Grasa

Fue la metodología oficial 920.39 *Fat (Crude) or Ether Extract* (AOAC, 2000), conocida como extracción continua o técnica de Goldfish, la que se adoptó para cuantificar grasa en las muestras. Este método extrae la grasa de la harina por acción de un disolvente, en este caso éter etílico, el cual se evapora y condensa continuamente arrastrando la grasa contenida en el alimento molido dentro de un cartucho poroso. Al final el éter se recupera y el aceite permanece en el vaso de Goldfish, calculando el peso del aceite por diferencia de peso. Se reporta como porcentaje de la fracción soluble en éter.

f) Almidón

Se utilizó el kit enzimático para la determinación de almidón total de la compañía Megazyme (Irlanda) método amiloglucosidasa/ α -amilasa conocido como el método 996.11 de la AOAC, 76.13 de la AACC o Método estándar 168 de la ICC. Básicamente, el almidón de la harina se purifica usando una solución de etanol. El almidón obtenido es hidrolizado enzimáticamente en dos tiempos. En el primer paso las dextrinas que se obtienen, debido a la actividad de la α -amilasa, son solubilizadas completamente; enseguida, ya en el segundo paso, son totalmente hidrolizadas hasta unidades de glucosa debido a la acción de la amiloglucosidasa. Cabe señalar que las dextrinas obtenidas son solubilizadas con dimetilsulfóxido (DMSO) a 100°C. La solución de glucosa derivada del almidón inicial es cuantificada espectrofotométricamente usando un reactivo conocido como GOPOD por las siglas de los compuestos que contiene que son glucosa oxidasa, peroxidasa y 4-aminoantipirina, compuesto que da una coloración guinda al reaccionar y cuya

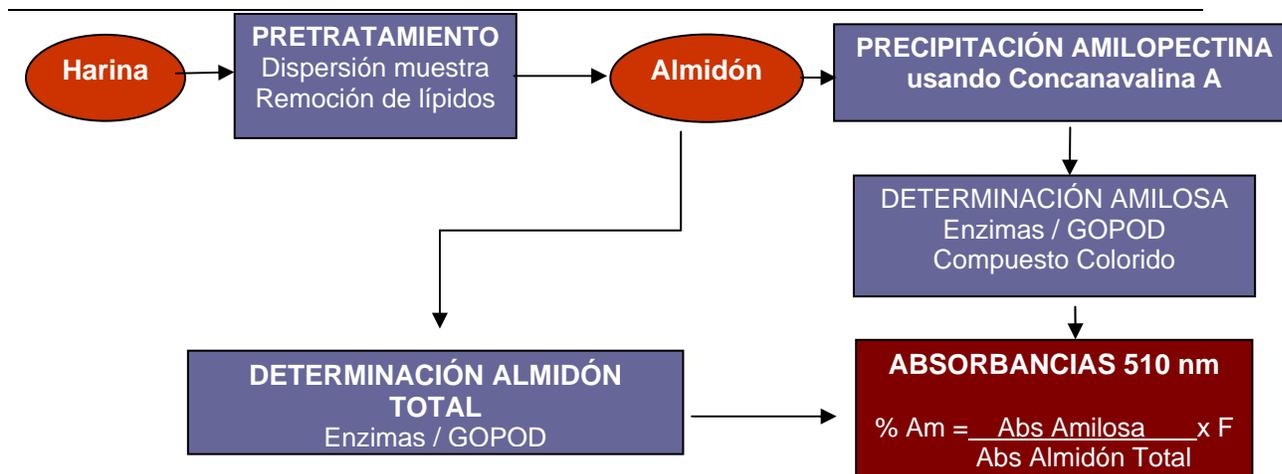


absorbancia es proporcional al contenido de glucosa. Se corren paralelamente un blanco y una referencia como controles para verificar que los datos obtenidos sean confiables y hayan sido obtenidos correctamente. Se reporta como gramos de almidón por 100 g de harina muestra.

3. Determinación de la relación amilosa y amilopectina en harinas

Se utilizó el kit llamado *Amylose/Amylopectin assay kit (AM/AMP 7/98)*, de la compañía irlandesa Megazyme (Irlanda) (Gibson, 1997) para determinar la relación amilosa/amilpectina de las harinas integrales de los maíces analizados. El método seleccionado se basa en la formación específica de complejos de amilopectina con la lectina Conavalina A (Con A). La Con A compleja específicamente polisacáridos basados en residuos α -D-glucopiranosil o α -D-manopiranosil con múltiples extremos reductores, por lo que sólo precipita a la amilopectina y no la amilosa.

Una muestra 20-25 mg de harina con un tamaño de partícula <0.5 mm es dispersada completamente mediante calentamiento en dimetil sulfóxido (DMSO). Los lípidos son removidos con etanol y el almidón precipitado es recuperado. Después de disolver el precipitado en una solución de acetato y sales, se toma una alícuota y la amilopectina es específicamente precipitada por la adición de Concanavalina A y removida por centrifugación. En una alícuota del sobrenadante la amilosa es hidrolizada enzimáticamente a glucosa, la cual es analizada usando reactivo de glucosa oxidasa/peroxidasa (GOPOD). El almidón total, al igual que la amilosa, es hidrolizado a glucosa y medido colorimétricamente con el GOPOD. La concentración de amilosa en la muestra de maíz es estimado como la relación de la absorbancia a 510 nm del sobrenadante de la muestra precipitada con Con A respecto a la absorbancia derivada del almidón total.



Fuente: Kit Megazyme, Ireland, 2005

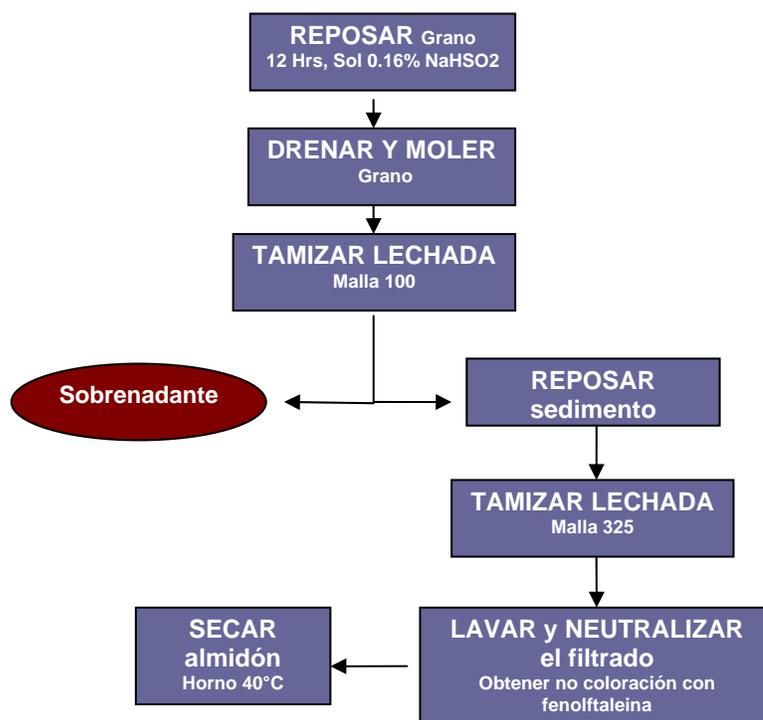
4. Aislamiento de almidón

El interés del proyecto fue aislar el almidón de las harinas de los maíces criollos primeramente ya que el tenerlo con una mayor pureza (>99%) permitiría determinar con mayor precisión sus propiedades térmicas (Temperatura de inicio, de pico y de finalización de gelatinización, Entalpía de gelatinización, entre otras), así como evaluar sin interferencias de otros componentes, las propiedades de absorción de agua de los almidones, y de esta forma compararlas con las harinas integrales.

Fue adoptado el método de Singh, 2004. La técnica utilizada se basa en la liberación de los gránulos de almidón que se encuentran embebidos en la matriz proteínica del endospermo mediante reducciones de los enlaces disulfuro de dichas proteínas presentes provocada por el bisulfito y por centrifugaciones constantes. El NaOH ayuda a reducir la cantidad de proteínas que se encuentran adheridas a la superficie del gránulo de almidón con lo cual se logra aumentar la pureza del almidón extraído. Aproximadamente 300 g de granos de maíz fueron limpiados y dejados reposar en agua con 0.16% de bisulfito de sodio por 12 hrs a 50°C. Una vez transcurrido el tiempo se drenó el agua de reposo y se molieron los granos en licuadora. La lechada producida se tamizó en malla 100, la lechada recuperada se dejó en reposo por 2 h.



El sobrenadante turbio se retiró y el sedimento se reposó en 5 - 6 volúmenes de solución de NaOH al 0.2% a 25°C por 12 hrs. La lechada resultante fue pasada por malla 325, el filtrado se volvió a suspender en agua destilada y se centrifugó (modelo de centrifuga, rotor 10 -tubos 500 mL), se decantó el sobrenadante y se verificó que no presentara coloración con fenolftaleína; el procedimiento fue repetido hasta que no presentó coloración. Finalmente el almidón fue secado en horno a 45°C por 24 hrs, al cabo del cual se molió con sumo cuidado hasta que atravesara malla 40 y enseguida se almacenó en botes cerrados de plástico a temperatura ambiente. Para comprobar su pureza a los almidones extraídos se les determinó su contenido de proteína por el método de Kjeldhal siendo siempre en todos los casos <math><0.25\%</math>. Además los almidones fueron molidos cuidadosamente en un mortero hasta obtener un tamaño de partícula menor de 0.5 mm con el objetivo de homogenizar las muestras.





5. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El interés de la MEB fue el de verificar la integridad de los gránulos y estimar su forma y tamaño de ellos. Las micrografías electrónicas de barrido fueron tomadas en la unidad de microscopía electrónica de la Unidad de Servicios a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química (UNAM) usando un microscopio electrónico de barrido JEOL Modelo 5900 LV. Una pequeña cantidad de almidón de cada muestra fue esparcida sobre una cinta adhesiva con una espátula hasta formar una delgada capa. El almidón fue recubierto con oro-paladio (40:60). Una aceleración de potencial de 10kV fue usada durante la toma de las micrografías a 2000x, 1000x y 500x.

6. Calorimetría diferencial de barrido (CDB)

La técnica de CDB ha sido ampliamente reconocida y usada en el estudio de las propiedades térmicas y en específico en la determinación de los parámetros de la gelatinización de almidones desde que Stevens y Elton reportaron las primeras endotermas de almidones de cereales en 1971. Las ventajas de la CDB es que se utilizan pequeñas cantidades de almidón y su procedimiento es relativamente sencillo de realizar. Para determinar los parámetros de la gelatinización se aplica calor a una velocidad constante a una cápsula de aluminio con la muestra previamente hidratada y a la de una referencia, la absorción de calor se registra y las diferencias entre la muestra y la referencia y a partir de aquí se determinan los parámetros de la gelatinización.

Se siguió el método de Li *et al.*, 1994. Se pesaron 3.5 mg de almidón previamente secado en una cápsula de aluminio y se les adicionó 8 μ L de agua bidestilada. De inmediato se selló la cápsula y se dejó reposar entre 1 a 2 horas como máximo. Se hizo el barrido de temperatura en un intervalo de 25 a 130°C. La velocidad de incremento de temperatura fue de 10°C/min. Se usó como referencia una cápsula con 8 μ L de agua bidestilada además



de calibrar la temperatura y la entalpía con estándares de Indio. Los análisis se realizaron por triplicado en un calorímetro diferencial de barrido Mettler Toledo modelo 821e. El software del equipo determinó el ΔH_{gel} , temperatura de inicio, pico y término (T_i , T_p y T_t). Además se calculó el intervalo de gelatinización ($T_t - T_i$), el índice de tamaño de pico ($\Delta H / ((T_t - T_i) / 2)$) y el ΔH_{amp} recalculando la entalpía de gelatinización con base en el contenido de amilopectina de cada almidón.

7. Propiedades de Absorción de Agua (Poder de Hinchamiento y % Sólidos solubles) a pH neutro y Alcalino

Las propiedades de Absorción de agua son muy importantes para evaluar la funcionalidad y el desempeño de las harinas y almidones de las muestras. Estas cualidades se encuentran profundamente relacionadas con la gelatinización, y por lo tanto con el hinchamiento y la lixiviación de sólidos al medio. El interés en particular está centrado en averiguar cual es el vínculo de la relación amilosa-amilopectina es estas propiedades de cada una de las harinas y almidones de las muestras de maíces criollos y la muestra de maíz híbrido. Otro punto a valorar es el comportamiento de las harinas y almidones a pH neutro y alcalino, el cual por estar más cercano a las condiciones de nixtamalización podría ser un valor más real.

Las propiedades de absorción de agua de interés fueron el Poder de Hinchamiento (PH) y el % de Sólidos Solubles (SS). El poder de hinchamiento es un parámetro ya clásico, de mucha facilidad de determinación y usado ampliamente; que se define como el peso húmedo del gel sedimentado dividido entre su peso seco (Leach, 1959) y es diferente de la Capacidad de Retención de Agua (CRA) -también conocida como Capacidad de Hinchamiento-. La CRA es el cociente entre el peso húmedo del gel sedimentado y su peso inicial en base seca (Li & Yeh, 2001). La diferencia estriba en que para el cálculo del PH, se considera el peso seco de los sólidos solubles y para el CRA no. Li & Yeh en 2001,



han reportado una correlación de $r^2 = 0.93$. Las fórmulas se pueden apreciar a continuación:

$$PH = G / (A - B)$$

$$CRA: G / A$$

PH: Poder de Hinchamiento

G: Peso del gel (g)

A: Peso seco del almidón (g)

B: Peso seco del material soluble en el sobrenadante (g)

El cálculo de los Sólidos Solubles se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

$$\% SS: B / A * 100$$

El método que se utilizó fue una adaptación de los métodos usados por Leach en 1959; Wang en 1996 y Tester en 1990; para la absorción alcalina usamos como referencia el método de Bryant y Hamaker en 1997. En el establecimiento del método definitivo útil para poder comparar las propiedades de absorción de los almidones y harinas a pH neutro y alcalino, además del uso de la literatura de referencia, se realizaron pruebas para fijar los principales parámetros que fueron: tiempo de calentamiento, temperatura, velocidad de centrifugación, cantidad de muestra, volumen de agua y concentración de cal. Estas pruebas se llevaron a cabo con un almidón de endospermo intermedio según su índice de flotación (38-62 granos flotantes).

En la determinación del PH y SS fue incorporado a las muestras un almidón de maíz ceroso, con el fin de destacar mayormente las diferencias respecto a la relación amilosa/amilopectina, ya que este almidón tiene un contenido de amilopectina >95%.

La metodología final quedó de la siguiente manera:



A un tubo de ensaye de vidrio con aproximadamente 0.1 g de muestra en base seca (se desengrasó previamente para evitar interferencias) se adicionaron 5 ml agua destilada con un pH ajustado a 7, se calentó a 80°C/20 min, agitando el tubo cada 10 minutos únicamente por 3 segundos a velocidad media sobre un vórtex. A continuación fue centrifugado a una velocidad de 1000g/15 min a una temperatura de 4°C. Posteriormente el sobrenadante fue vertido sobre un pesafiltro metálico o de vidrio previamente seco, pesado y mantenido a peso constante. El tubo fue escurrido sobre el pesafiltro 10 minutos en un ángulo de 45° aproximadamente. Enseguida, el tubo con el gel sedimentado y escurrido se pesó en balanza analítica. El pesafiltro con el sobrenadante se secó en un horno a una temperatura aproximada de 50°C. Para la determinación alcalina, se agrega 5 ml de una solución al 0.1% de cal en agua destilada y se siguió el mismo procedimiento.

8. Parámetros de Nixtamalización

La finalidad de determinar los parámetros de nixtamalización fue por que ello permite evaluar el desempeño de las muestras en dicho proceso. Así mismo, el objetivo fue tratar de relacionarlo con las propiedades fisicoquímicas previamente descritas, como la absorción de agua de harinas y almidones y su composición, incluyendo la relación amilosa-amilopectina. Para determinar los parámetros se modificó la norma NMX-FF-034/1-2002 PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS PARA CONSUMO HUMANO – CEREALES – PARTE I: MAÍZ BLANCO PARA PROCESO ALCALINO PARA TORTILLAS DE MAÍZ Y PRODUCTOS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO- ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA, y consistió en usar 100 g en lugar de 200g debido a que la muestra disponible no era suficiente. Las modificaciones consistieron en variar la cantidad de muestra a cocer alcalinamente, el método de determinación de humedad y la obtención del rendimiento del grano nixtamalizado (GN).



Los parámetros valorados fueron:

- 1) Porcentaje de Humedad de GN
- 2) Pérdida de materia seca
- 3) Rendimiento del GN

La metodología consistió en agregar 100 g de grano limpio libre de impurezas en un vaso de 600 ml previamente pesado y mantenido a peso constante y que contuviera 400 mL de agua calentada hasta 91°C y con 1 g de cal disuelta Ca(OH)_2 grado alimenticio, El topo, Monterrey, N.L., México). Enseguida se calentó según el tiempo estipulado en la siguiente tabla basado en el índice de flotación:

Una vez realizado lo anterior se dejó reposar por 1 hora, acto seguido, los granos cocidos fueron separados recuperando el agua de cocimiento. Los granos fueron lavados con 200 mL de agua con ayuda de un colador, recibiendo esta agua con el vaso que contenía el agua de cocimiento. En este momento se pesaron, se tomaron tres granos y fueron colocados en un pesafiltro a peso constante. Los granos del pesafiltro se secaron en un horno a 50°C para determinar su contenido de humedad mientras que las aguas de cocimiento y de enjuague recuperadas eran calentadas con mechero con el fin de concentrarlas. Una vez que solo había una mínima cantidad de agua fueron secadas a 90°C en el horno hasta que se evaporó todo el contenido, posteriormente se enfrió en desecador y se pesó. Esto es el peso del vaso con materia seca. Los cálculos realizados se describen a continuación:

% Materia seca = $\frac{\text{peso vaso con materia seca (g)} - \text{peso del vaso (g)}}{\text{peso maíz nixtamalizado (g)}} * 100$

% Rendimiento = $\frac{\text{Peso de granos nixtamalizados}}{\text{peso maíz nixtamalizado}} * 100$



9. Análisis estadístico

Para realizar un análisis de los resultados más minucioso es importante establecer estadísticamente las diferencias significativas existentes, las tendencias y comportamientos que posean. Las diferencias significativas se determinaron mediante el análisis de variancia (ANOVA), y sólo en caso de existir tal diferencia, se reportaron los grupos homogéneos estadísticamente diferentes obtenidos usando la prueba de Duncan. Las tendencias y comportamientos de los resultados se evaluaron mediante un análisis de correlación de Pearson simple (conocida con el símbolo “r”). Esta mide la relación lineal entre dos variables determinando la fuerza y la dirección de tal asociación (SPSS for Windows, 2006). Las variables fueron las diferentes propiedades medidas a los maíces (contenido de amilosa, poder de hinchamiento, ΔH , etcétera) y se formaron por el conjunto de cada uno de los valores promedios de cada muestra para la variable en cuestión. La correlación de Pearson presenta valores entre -1 y +1. Un valor positivo significa una relación directa entre las dos variables correlacionadas. Los criterios para indicar la fuerza de la correlación fueron los siguientes:

- 0 a 0.30 correlación débil
- 0.31 a 0.60 correlación moderada
- 0.61 a 1.0 correlación fuerte

Todas las pruebas fueron realizadas con el software de computadora SPSS 15.0 para Windows (2006).



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Recolección de muestras y pruebas físicas

a) Muestras utilizadas

Las variedades recolectadas se enlistan en la tabla 9. La selección de las variedades de maíz utilizadas intentó abarcar los diferentes tipos de criollos existentes en la zona central de México, con el fin de contrastar diferencias y similitudes entre las características evaluadas en esta investigación, poniendo atención en la variabilidad fenotípica que presentan.

Tabla 9. Muestras recolectadas de granos de maíces criollos e Híbridos y algunos datos obtenidos en su recolección

	<p style="text-align: center;">CACAHUACINTLE^{bd}</p> <p>Tipo: criollo harinoso Origen: Toluca, Estado de México Altitud: 2540 msnm Lugar recolección: Mercado San Ángel, México D. F. Área de adaptación: Subtropical Color: Blanco Endospermo: Muy suave Usos: Pozole, Gorditas de la Villa, etc.</p>
	<p style="text-align: center;">ANCHO^{cd}</p> <p>Tipo: criollo harinoso Origen: Morelos Lugar recolección: Mercado Xochimilco, México D. F. Altitud: 1560 msnm Área de adaptación: Tropical Color: Blanco Endospermo: Muy suave Usos: Pozole</p>
	<p style="text-align: center;">AZUL^{ed}</p> <p>Tipo: criollo azul Origen: Tultepec, Estado de México Lugar recolección: Puesto sopes y quesadillas, Ecatepec, Estado de México Altitud: 2300 msnm Área de adaptación: Subtropical Color: Azul Endospermo: Suave Usos: Tortilla azul, quesadillas, sopes</p>



	<p style="text-align: center;">NEGRO^a</p> <p>Tipo: criollo Negro Origen: Zona alta Hidalgo Lugar recolección: Donación PORTIMEX S. A. de C. V. Altitud: 2426 msnm Área de adaptación: Trópico seco Color: Negro Endospermo: Duro Usos: alimento a ganado</p>
	<p style="text-align: center;">CHALQUEÑO^{bd}</p> <p>Tipo: Criollo Blanco Origen: Chalco, Estado de México Lugar recolección: Mercado Xochimilco D. F. Altitud: 2200 msnm Área de adaptación: Trópico húmedo Color: Blanco Endospermo: Intermedio Usos: Tortilla, memelas en general</p>
	<p style="text-align: center;">HIDALGO^{ad}</p> <p>Tipo: Criollo cremoso Origen: Hidalgo Lugar recolección: Donación PORTIMEX S. A. de C. V. Altitud: 2426 msnm Área de adaptación: Trópico seco Color: Amarillo Endospermo: Duro Usos: Alimentación a ganado y animales de corral</p>
	<p style="text-align: center;">MEZCLA HÍBRIDOS^{ad}</p> <p>Tipo: Híbrido Origen: Sinaloa, Jalisco, Hidalgo y Guanajuato Lugar recolección: Donación PORTIMEX S. A. de C. V. Altitud: N.A. Área de adaptación: N.A. Color: Amarillo Endospermo: Muy duro Usos: Alimentación a ganado y aves, producción industrial de la masa y tortilla</p>

N.D.: No disponible N.A.: No aplicable por ser una mezcla de maíces de varias procedencias.

Fuentes: a) Portimex S. A. de C. V. b) Distribuidor particular Mercado de San Angel, México DF. c) Distribuidor comercial mercado de Xochimilco, México DF. d) Ortega, 2003. e) Pequeño distribuidor comercial de productos de maíz, Ecatepec, Estado de México.



b) Pruebas Físicas

Se realizaron las pruebas físicas a las muestras que se enlistan en la tabla 10. El maíz que presentó la menor densidad fue el Ancho seguido por el Cacahuacintle, mientras que la muestra más densa fue la Mezcla de Híbridos. Los demás criollos estuvieron en una situación intermedia entre estos dos. Respecto al peso de 1000 granos, los granos del maíz Ancho y los de Cacahuacintle fueron los más grandes en comparación con los del maíz Negro y los de la Mezcla de Híbridos, los cuales fueron los mas pequeños.

En el capítulo anterior se señaló que el Índice de flotación es un parámetro que se utiliza para determinar el tipo de endospermo o su "Dureza" (Pratt, *et. al.*, 1995). Como se observa en la tabla 10, las muestras analizadas oscilan desde un endospermo muy suave, como el Cacahuacintle y el Ancho, hasta uno muy duro, que sería el caso de la Mezcla de Híbridos. Un endospermo muy suave se asocia con una textura harinosa y uno muy duro con una del tipo cornea.

La dureza ha sido vinculada al tipo y cantidad de zeínas que existen en el endospermo, así como con la relación existente entre ellas; la proporción de cada tipo de zeína es una característica independiente controlada genéticamente (Pratt *et al.*, 1995). Esto ha provocado que se rechace la idea de que en los endospermos de maíces suaves predomina la molécula de amilosa y en el de los duros la molécula de amilopectina, según han señalado autores como Boyer y Hanna, (1994).

De manera global se puede afirmar que los criollos analizados muestran mayor variabilidad en sus características físicas, sin embargo tienden a presentar un endospermo más harinoso y un grano más grande, a diferencia de la Mezcla de Híbridos que tiene un endospermo muy duro o corneo y un grano pequeño.

Tabla 10. Resultados de las pruebas de Plataforma: Densidad, Peso de 1000 granos, Índice de Flotación y Tipo de Endospermo

Muestra	Densidad (Kg/HL)*	Peso 1000 granos (g)*	Índice Flotación*	Tipo Endospermo
Cacahuacintle	67.93	712.2	100	Muy suave
Ancho	64.55	976.2	91	Muy suave
Azul	77.31	385.5	68.67	Suave
Negro	80.85	309.1	30	Duro
Chalqueño	77.33	471.1	47.33	Intermedio
Hidalgo	80.57	369.1	16.67	Duro
Mezcla Híbridos	81.54	336.4	9.33	Muy duro

*Resultado promedio de tres réplicas

Las particularidades físicas de cada grano contribuyen a la definición del uso que se les da, mismo que va desde la elaboración de un platillo típico como el pozole, hasta la resistencia mecánica en el cosechado, transporte y manejo en general del cereal, incluyendo la resistencia a ser atacado por plagas, que son los usos que interesan a la industria.

2. Análisis Proximal

Los contenidos de humedad de los granos se ubicaron entre 9.1 y 10.3% (tabla 11). Un contenido mayor al 14% implicaría una mayor susceptibilidad de la muestra al ataque microbiano. El contenido de humedad está influenciado por el tipo de grano y su manejo, es decir el tipo de secado, las condiciones climáticas y de almacenamiento (humedad y temperatura), entre otras. En el desarrollo del experimento las muestras fueron colocadas en recipientes de vidrio y/o polietileno sellados con parafilm.

El contenido de cenizas fue de 1.3 a 1.6 % y tienen como origen los minerales presentes principalmente en el pericarpio y el germen como sales de calcio, magnesio, fosforo,



aluminio, hierro, sodio, potasio y cloro; provenientes del suelo de cultivo y los fertilizantes utilizados.

Para el contenido de cenizas se encontró diferencia estadísticamente significativa, y se ubicaron 4 subgrupos homogéneos. Los maíces de más bajo contenido fueron la Mezcla de Híbridos (1.3%) y Chalqueño (1.4%), mientras que los criollos Cacahuacintle (1.5%), Azul (1.6%) e Hidalgo (1.6%) fueron los más altos. En un orden intermedio estuvieron el Negro (1.4%) y Ancho (1.4%). Un alto contenido de cenizas indica una mayor presencia de pericarpio. Los maíces Mezcla de Híbridos y Chalqueño, que tienen amplio uso en la elaboración industrial y doméstica de masa y tortilla, tuvieron un bajo contenido de cenizas.

Respecto al contenido de Lípidos existió diferencia estadística y se reconocieron 3 grupos homogéneos (Tabla 11). Los contenidos de lípidos en las variedades van desde 5.5 hasta 6.8 %. El de menor contenido fue la Mezcla de Híbridos y el de mayor fue el Hidalgo. Los valores de los maíces aceiteros es de alrededor de 7.5 ± 0.5 %. La muestra Hidalgo al tener un contenido muy cercano podría ser considerada para la obtención de aceite. Los demás valores se ubicaron ligeramente por encima de los valores promedio reportados para diferentes variedades de maíces (4.0 – 6.1%) según Méndez-Montealvo, 2005.

El contenido de proteínas osciló de 7.2 a 8.8 % y existieron 3 grupos estadísticamente diferentes. Las variedades Cacahuacintle y Negro fueron las que tuvieron un menor contenido de proteínas (7.2 y 7.5%, respectivamente) y la variedad que presentó el mayor contenido fue la del maíz Azul (8.8%). Los maíces estuvieron por abajo del contenido de proteínas promedio reportado para maíces híbridos amarillos que es de 9.5% (Watson y Ramstad, 1987), lo que se puede deber a su origen genético.

El contenido de Almidón se encontró entre 61.3 hasta 69.2%, la variación entre las muestras fue de 7.9%. Los contenidos para las muestras fueron bajos respecto al



contenido promedio de almidón reportado de 71.5% para variedades híbridas amarillas (Watson, 1987); además de otros estudios realizados para diversas variedades criollas e híbridas mexicanas que fue de 70 a 77 % (Méndez-Montealvo *et al.*, 2005). La diferencia con los resultados de Méndez-Montealvo *et al.*, 2005 pudo haberse debido a que en la metodología de cuantificación de almidón que utilizaron no purifican el almidón, es decir no remueven otros carbohidratos diferentes al almidón presentes en las harinas producto de la molienda como oligos y disacáridos los cuales producen glucosa al ser digeridos enzimáticamente y por tanto sobreestimar el valor ya que el almidón se mide a partir de las unidades de glucosa generadas. La diferencia en el contenido de almidón con los datos reportados por Watson en 1987 puede deberse a que en este caso son variedades criollas y no amarillas híbridas.

En el presente trabajo las muestras con mayor contenido fueron los criollos Negro (69.2%), Cacahuacintle (68.3%) y Ancho (67.4%), y las de menor contenido fueron Chalqueño (61.3%) e Hidalgo (63.4%). El maíz amarillo preferido por la industria del almidón y sus subproductos (espesantes alimenticios y no alimenticios, grits, alimentos balanceados, etc.) debe tener entre 65 y 68% de almidón, 8.5 a 9% de proteína y aproximadamente 5% de aceite. Todos los maíces excepto el Chalqueño e Hidalgo tienen el contenido apropiado de almidón para estas aplicaciones, pero sólo el maíz azul cumple con los requerimientos de proteína y lípidos por lo que podría ser un candidato a ser usado en esta industria, aunque es mucho más apreciado por su color para aplicaciones culinarias. Sin embargo si el interés es únicamente el rendimiento de almidón las restantes variedades criollas, Cacahuacintle, Ancho y Negro, pueden asegurar un rendimiento adecuado.

Además, puede esperarse que los maíces con alto contenido de almidón generen una masa con mejores propiedades reológicas y de textura, ya que el almidón es el principal



compuesto que influye en dichas propiedades así como en la absorción de agua de la masa. Por lo tanto, el contenido de almidón se espera que tenga implicaciones importantes en la definición de los usos que tiene cada criollo.

Tabla 11. Composición química de variedades de maíces criollos y la Mezcla de Híbridos**

	<i>Cac</i>	<i>Anc</i>	<i>Azu</i>	<i>Neg</i>	<i>Cha</i>	<i>Hgo</i>	<i>MH</i>	<i>Duncan</i> ($p > 0.05$)
Humedad g/100 g mta	9.6 ± 0.21	9.9 ± 0.1	9.6 ± 0.09	10.3 ± 0.1	10.1 ± 0.11	9.1 ± 0.16	9.2 ± 0.21	ND
Cenizas g/100 mta Base seca	1.5 ± 0.02	1.4 ± 0.007	1.6 ± 0.1	1.4 ± 0.01	1.3 ± 0.1	1.6 ± 0.01	1.4 ± 0.01	Cha MH MH Neg Anc Neg Anc Cac Cac Hgo Azu
Lípidos g/100 mta Base seca	5.8 ± 0.5	6.1 ± 0.4	5.7 ± 0.4	6.3 ± 0.06	6.1 ± 0.1	6.8 ± 0.1	5.5 ± 0.2	MH Azu Cac Cha Azu Cac Cha Anc Neg Hgo
Proteínas g/100 mta Base seca (Nx6.25)	7.2 ± 0.2	8.0 ± 0.3	8.8 ± 0.2	7.5 ± 0.07	8.1 ± 0.04	8.2 ± 0.2	8.2 ± 0.09	Cac Neg Anc Cha MH Hgo Azu
Almidón g/100 mta Base seca	68.3 ± 2.84	67.4 ± 3.05	66.2 ± 0.49	69.2 ± 2.49	61.3 ± 1.37	63.4 ± 0.11	66.3 ± 1.71	ND
Fibra g/100 mta Base seca*	17.2	17.1	17.7	15.6	23.2	20	18.6	ND

ND: No Determinado *; Resultado obtenido por diferencia. **Los resultados son promedios de tres réplicas.



3. Relación Amilosa-Amilopectina

Se logró determinar la relación amilosa/amilopectina en el almidón para las variedades de maíz criollo y la mezcla de Maíces Híbridos. Las muestras analizadas tuvieron un coeficiente de variación máximo del 6%, lo que significa que el método es útil para determinar esta relación y encontrar posibles diferencias significativas. Los resultados se aprecian en la tabla 12, y en la gráfica 1.

Tabla 12. Contenido promedio de Amilosa (%) y Amilopectina (%) con sus desviaciones estándar en los almidones de las muestras de maíces criollos y Mezcla de Híbridos*

VARIEDAD	g Amilosa/100 g almidón	g Amilopectina/100 g Almidón
Cacahuacintle	24.3 ± 0.9 c n = 3 cv = 3.8	75.7 ± 0.9 a n = 3 cv = 1.2
Ancho	22.6 ± 0.3 b n = 3 cv = 1.5	77.4 ± 0.3 b n = 3 cv = 0.4
Azul	22.1 ± 0.3 b n = 3 cv = 1.3	77.9 ± 0.3 b n = 3 cv = 0.4
Negro	22.4 ± 1.3 b n = 3 cv = 6.0	77.6 ± 1.3 b n = 3 cv = 1.7
Chalqueño	18.5 ± 0.6 a n = 3 cv = 3.5	81.4 ± 0.6 c n = 3 cv = 0.6
Hidalgo	22.5 ± 0.8 b n = 3 cv = 3.5	77.5 ± 0.8 b n = 3 cv = 1.0
Mezcla Híbridos	21.4 ± 0.2 b n = 3 cv = 0.9	78.6 ± 0.2 b n = 3 cv = 0.2

n: repeticiones, cv= Coeficiente de variación, *Se muestran los promedios de tres repeticiones y sus desviaciones estándar, las letras diferentes entre muestras significan que hay diferencia estadística(p>0.05)



a) Contenido de Amilosa en el Almidón

Se encontraron diferencias significativas en los resultados. La muestra que presentó un mayor contenido de amilosa fue el maíz Cacahuacintle (24.3%) y la de menor contenido fue el Chalqueño (18.5%). Las demás muestras se mantuvieron en un intervalo intermedio que no presentó diferencia significativa y que osciló entre 21.4%, para la Mezcla de Híbridos, y 22.6% para el Ancho. La diferencia entre el contenido de amilosa para las muestras con menor y mayor contenido fue de 5.8%.

Los almidones de maíces del Cacahuacintle, Ancho e Hidalgo retrogradarían a mayor velocidad que las demás muestras debido a que tienen mayor contenido de amilosa (24.3, 22.6 y 22.5% respectivamente) y esta molécula retrograda más fácilmente que la amilopectina. La retrogradación del almidón ocurre al “recristalizarse” las cadenas de almidón, mediante la formación de puentes de hidrógeno intermoleculares, lo que permite excluir el agua de esas zonas. Esto, sucede principalmente entre las cadenas no ramificadas más largas, lo que se ve favorecido en la amilosa. Este mismo proceso sucede cuando el almidón se retrograda, es decir, que una vez gelatinizado en una masa, en el pan o en las tortillas, pierde humedad: los puentes de hidrógeno de las múltiples moléculas atrapadas en la estructura gelatinizada se sustituyen por puentes de hidrógenos intermoleculares al ser evaporada el agua del sistema, las cadenas se acercan ya que los puentes de hidrógeno formados las acercan más y excluyen al agua del sistema. El endurecimiento del pan y las tortillas sigue este mecanismo general. Actualmente se le ha dado un nuevo enfoque a este mecanismo de exclusión del agua para generar el llamado “almidón resistente”, que considera este mismo mecanismo y que se enfoca a productos dietéticos. La característica nutricional del almidón retrogradado es que es resistente a la acción de las enzimas intestinales que participan en la digestión, por lo que nutricionalmente se conoce a estos almidones como resistentes. Estos almidones



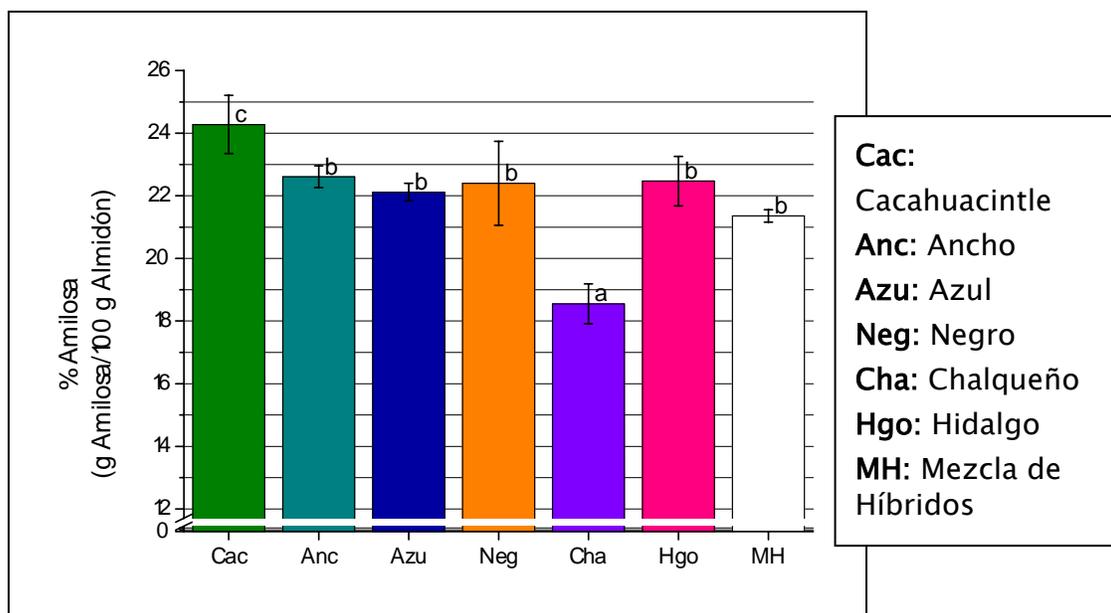
más retrogradados podrían usarse para obtener productos dirigidos a personas con obesidad y sobrepeso (Agama-Acevedo *et al.*, 2005). Otra cualidad sería el ser útiles en la prevención de enfermedades cardiovasculares y diabetes, ya que el consumo de almidones resistentes está asociado con la disminución del colesterol y glucosa en sangre (Asp *et al.*, 1996). Sin embargo, para personas saludables y con un metabolismo normal, este proceso no les es ventajoso y para personas con un fuerte desgaste físico y que requieren de un alto consumo de carbohidratos, como los deportistas de alto rendimiento, este tipo de almidón resistente no les es conveniente por que al no poder digerir estos almidones resistentes no absorben moléculas de glucosa disminuyendo la ingesta calórica por parte de las personas.

La amilosa juega un papel complejo en la definición de las características de textura de productos elaborados con almidón, mientras que por un lado la fracción de amilosa acomplejada con lípidos evita la pérdida de agua disminuyendo la velocidad de retrogradación de almidones y mejorando las características reológicas y de textura de la masa; de forma contraria la fracción no acomplejada de la amilosa retrograda a mayor velocidad generando que el producto endurezca más rápidamente y por tanto afectando negativamente las características de textura del producto. Dependiendo de la capacidad de interacción con los lípidos por parte de la amilosa es como se van a definir los efectos de esta molécula en las propiedades de los almidones. En la definición global de las propiedades hay que añadir el efecto de la amilopectina.

Debido al bajo contenido de amilosa (18.5%), el almidón del maíz Chalqueño se espera que no retrograde rápidamente, y por lo tanto se espera que las propiedades de textura de los productos que se elaboran con este maíz, como las tortillas, no varíen



drásticamente. Esta cualidad puede ser aprovechada en la elaboración de ciertos productos como tortillas para aumentar el tiempo de su vida de anaquel en lugar de usar diversos aditivos como hidrocoloides y gomas para retardar la retrogradación.



Letras diferentes en lo alto de la columna indica que existió diferencia estadística con $p > 0.05$.

Gráfica 1. Contenido de Amilosa (%) en los almidones de los maíces criollos y Mezcla de Híbridos.

Como se mencionó anteriormente, parte de las cadenas de amilosa se encuentran asociadas con lípidos formando complejos dentro de los gránulos; a estos lípidos, compuestos principalmente por fosfolípidos (aunque también mono y diacilgliceroles) se les conoce como lípidos “ligados” en contraposición a los lípidos “no ligados” o “libres” que son de naturaleza apolar. Morrison y Laignelet reportaron en 1983 un 18.7 a 21% de cadenas de amilosa acomplejadas con lípidos en almidón de maíz, siendo el contenido de los fosfolípidos proporcional al contenido de amilosa. Es así que se esperarían mayores cantidades de estos complejos en almidones de maíces como el Cacahuacintle y Ancho. Estos complejos amilosa-lípidos tienen efectos importantes en las propiedades fisicoquímicas y de textura de los almidones como por ejemplo inhibiendo su hinchamiento



y reduciendo su solubilización y adherencia, además incrementa la temperatura de máxima viscosidad y la resistencia a la pérdida de viscosidad de suspensiones de almidón y disminuye la temperatura de la formación del gel y su fuerza (Tester y Morrison, 1990; Tester *et al.*, 1993; White, 2003 y Jane *et al.*, 1999). Las interacciones entre la amilosa y los lípidos ocurren durante los tratamientos térmicos y de nixtamalización del maíz, repercutiendo en la calidad de la masa nixtamalizada y de las tortillas, siendo los lípidos un agente retardante de la pérdida de agua en las tortillas y por tanto evitando su endurecimiento rápido (Hahn y Hood, 1987 y Arambula-Villa *et al.*, 2001). El mecanismo de tal efecto de los lípidos es evitando la interacción y el reordenamiento de las cadenas de amilosa y las cadenas externas de amilopectina, por lo que se evita su retrogradación, además de un efecto surfactante.

Respecto a otros valores que se tienen de amilosa en almidones de maíz se pueden encontrar:

→ **29.4%** en maíz híbrido sembrado en Escocia, cuantificado colorimétricamente por unión a yodo (Tester y Morrison, 1990)

→ **29.4%** en maíz amarillo híbrido sembrado en Estados Unidos, cuantificado colorimétricamente por unión a yodo (Jane *et al.*, 1999)

→ **22.4%** en maíz dentado mexicano (variedad híbrida) cuantificado con método de Concanavalina A de Megazyme analizado por un grupo mexicano (Toro-Vázquez & Gómez-Aldapa, 2001).

Los resultados reportados por otros autores para maíces criollos mexicanos son los siguientes:

→ **20, 22 y 27 %** para almidones de maíces Negro, Azul y Blanco respectivamente usando un método colorimétrico con yodo (Agama-Acevedo *et al.*, 2005).



Los valores obtenidos usando el método de la Concanavalina A difieren significativamente de los recabados con el método colorimétrico por afinidad a yodo de Tester y Morrison en 1990 y Jane *et al.*, en 1999. Ha sido demostrado que hay una sobreestimación en el contenido de amilosa utilizando el método colorimétrico debido a la presencia de cadenas lineales largas en las ramas de la molécula de amilopectina que al igual que las cadenas de amilosa forman complejos con el yodo. Los valores para el Negro y el Azul son similares a los reportados por Agama-Acevedo *et al.*, en 2005, aunque cabe esperar que esos sean sobrestimados. No necesariamente tienen que coincidir los valores ya que la composición química puede variar dependiendo del estadio fisiológico, raza, variedad, tecnología de cultivo y clima (Billeb y Bressani, 2001).

b) Contenido de Amilopectina en el Almidón

La muestra con mayor contenido de amilopectina fue el maíz Chalqueño con 81.4% y la de menor contenido fue el Cacahuacintle con 75.7% estando los demás maíces en un nivel intermedio que varió de 78.6% para la mezcla de Híbridos a un 77.4% para el maíz Ancho. En este caso la diferencia entre el maíz Chalqueño y el Cacahuacintle es de 5.7%. Aunque el contenido de amilopectina se calculó por diferencia a partir de los datos experimentales de contenido de amilosa en almidón si es un dato confiable al provenir de la aplicación de un método que ha demostrado precisión, además debido a la importancia que tiene esta molécula en las propiedades de almidones se discutirá a continuación su contenido y sus posibles repercusiones principalmente en la gelatinización.

Es necesario tener en cuenta que los gránulos de almidón son estructuras que presentan zonas cristalinas (15 - 45%) y zonas amorfas. La molécula de amilopectina con sus cadenas laterales compone principalmente las zonas cristalinas del almidón (aunque también la amilosa participa aunque en menor cantidad), mientras que en las zonas



amorphas se hallan principalmente las moléculas de amilosa y en grado menor las zonas de ramificación de la amilopectina (Gallant *et al.*, 1997, Hoover, 1993 y Singh *et al.*, 2003). Jane *et al.*, en 1999 demostraron que una mayor longitud de las cadenas ramificadas de amilopectina influye de manera proporcional en la cantidad de regiones cristalinas y de cristalinidad del almidón, acrecentando la temperatura y la entalpia de gelatinización probablemente porque estas cadenas largas establecen mayor cantidad de interacciones moleculares dando como resultado una mayor cristalinidad y mayor estabilidad energética. Otro efecto de la existencia de largas cadenas en la amilopectina, es inhibir el hinchamiento en almidones (Tester *et al.*, 1993), posiblemente porque las cadenas largas forman un gran número de zonas cristalinas, incrementando la estabilidad del gránulo y reduciendo por lo tanto su hinchamiento (Hoover, *et al.*, 2003). Por si fuera poco, a la cadena de amilopectina se encuentran unidos grupos fosfatos en forma de monoesteres, lo que provoca un aumento de la viscosidad y de la capacidad de absorción de agua (Singh *et al.*, 2003).

c) Consideraciones Generales sobre la Relación Amilosa/ Amilopectina

Las variaciones en el contenido de amilosa/amilopectina entre las muestras no son tan grandes como se esperaba, sin embargo con pequeñas variaciones en el contenido de amilosa/amilopectina, aunado a características como la longitud de los extremos lineales, sobre todo de la amilopectina, se logran efectos importantes en las propiedades de harinas y almidones; como se reporta en varias publicaciones (Tester y Morrison, 1993; Singh, 2005; White, 1995) y en esta tesis.

Tester y Morrison (1997) al estudiar el efecto que tienen la amilopectina, la amilosa y los lípidos en la gelatinización de almidón de variedades de maíz y cebada céreos y normales, concluyeron que el hinchamiento es una propiedad esencialmente de la



amilopectina, y la amilosa con los lípidos bajo las condiciones en las que se forman los complejos amilosa-lípidos inhiben el hinchamiento. Según lo concluido por Tester y Morrison, se puede esperar que la muestra de Chalqueño, con alto contenido de amilopectina (81.4%), absorba mayores cantidades de agua que una con un menor contenido de amilopectina y mayor en amilosa como el Cacahuacintle (75.7%).

d) Amilosa y Amilopectina en las harinas de las muestras

La tabla 13 muestra los contenidos de Amilosa y Amilopectina por gramo de harina, es decir los contenidos absolutos, calculados a partir de sus contenidos de almidón para cada muestra. Los valores absolutos de amilosa estuvieron entre 11.4 y 16.6% lo que implica una diferencia de 5.2%, siendo esta diferencia ligeramente menor que para los valores relativos (g amilosa por gramo de almidón), la cual fue de 5.6%. El Cacahuacintle siguió teniendo el mayor contenido de amilosa (16.6%) y el Chalqueño el menor (11.4%). A diferencia de los valores relativos, los valores absolutos de amilosa de las muestras restantes (Negro, Ancho, Azul, Hidalgo y la Mezcla de Híbridos) se ubicaron en dos grupos intermedios en lugar de uno, lo que significa que debido a las variaciones en el contenido de almidón las variedades mostraron mayores diferencias significativas.

En el contenido absoluto de amilopectina se puede notar cómo la harina del maíz Chalqueño a pesar de tener el mayor contenido de amilopectina por gramo de almidón (valores relativos), es el que tiene el valor más bajo para el contenido de amilopectina expresado por gramo de harina. Esto es ocasionado por el bajo contenido de almidón para la harina de esta muestra respecto a las demás.



Tabla 13. Contenido de Amilosa (%) y Amilopectina (%) por gramo de harina de los maíces criollos y la Mezcla de Híbridos.

	g Amilosa/100 g Harina*	g Amilopectina/100 g Harina*
Cacahuacintle	16.6 ± 0.6 d	51.7 ± 0.6 b
Ancho	15.2 ± 0.2 c	52.2 ± 0.2 b
Azul	14.6 ± 0.2 bc	51.5 ± 0.2 b
Negro	15.5 ± 0.9 c	53.7 ± 0.9 c
Chalqueño	11.4 ± 0.4 a	49.9 ± 0.4 a
Hidalgo	14.2 ± 0.5 b	49.1 ± 0.5 a
Mezcla Híbridos	14.2 ± 0.1 b	52.1 ± 0.1 b

*Los resultados muestran desviaciones estándar. Letras diferentes significan que hay diferencia estadística ($p > 0.05$)

4. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se lograron obtener micrografías electrónicas de barrido para cada muestra de almidón, así como para la harina integral del maíz Chalqueño. En la figura 10 se observan las micrografías de los gránulos del almidón con sus morfologías características que van desde una forma oval un tanto suavizada hasta una poliédrica muy marcada (Toro-Vazquez y Gómez-Aldapa, 2001). Los ángulos de la mezcla de Híbridos están más marcados (forma poliédrica) en comparación con los del maíz Cacahuacintle en donde se aprecian gránulos con ángulos mucho más suavizados e inclusive sin ángulos, es decir redondo o curvo. Al ordenar de mayor a menor la predominancia de la forma poliédrica (ver figura 12) de las muestras hay una correlación con las densidades de los granos ordenadas de mayor a menor:

Predominancia forma poliédrica:

Mezcla Híbridos > Hidalgo > Chalqueño > Negro > Azul > Ancho > Cacahuacintle

Densidad del grano:

Mezcla Híbridos > Hidalgo > Negro > Chalqueño > Azul > Cacahuacintle > Ancho

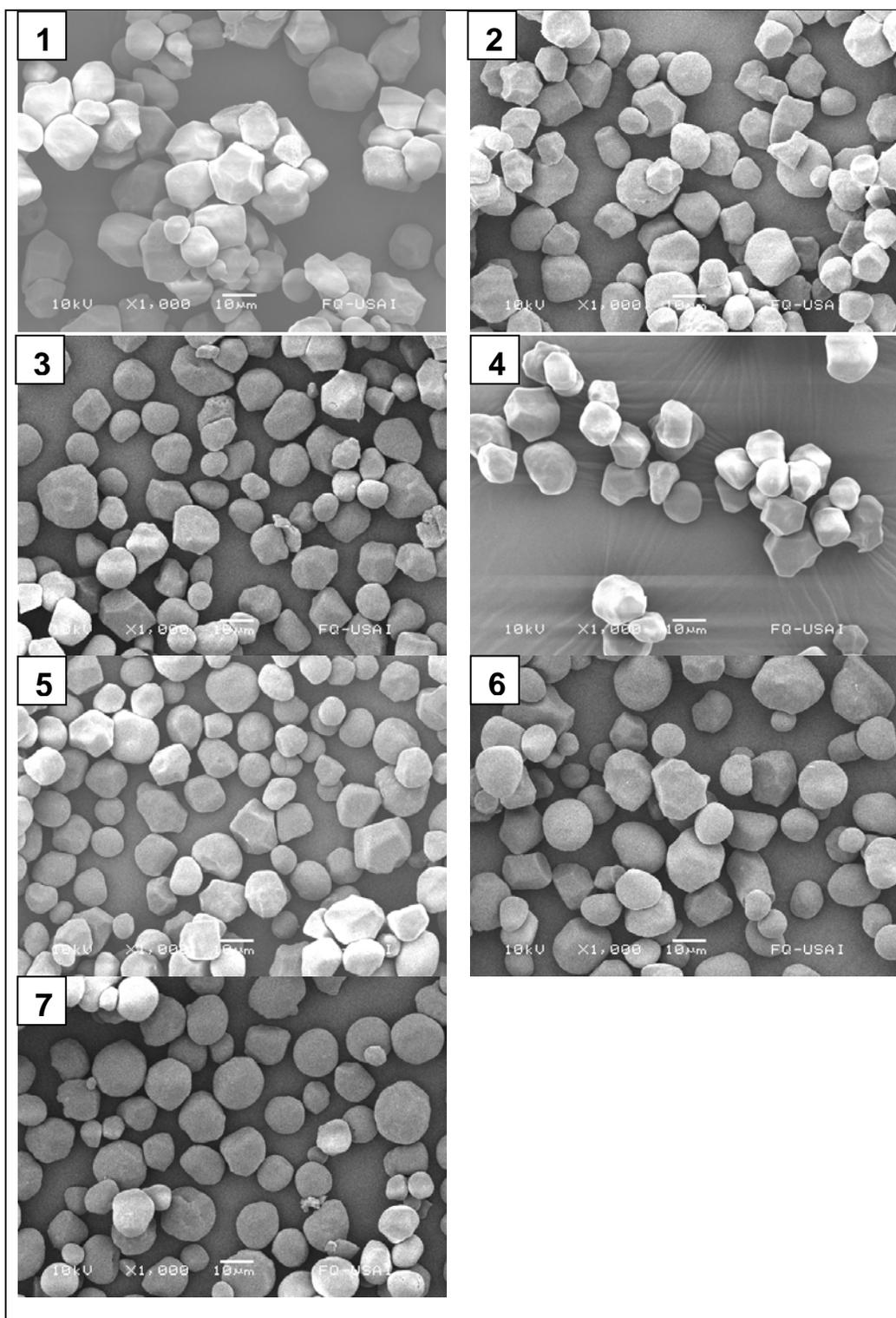


Figura 10. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) de almidones extraídos de varias muestras de almidones criollos y una muestra de maíz híbrido (x1000 y 10 kV). 1) Mezcla de maíces Híbridos 2) Hidalgo 3) Negro 4) Chalqueño 5) Azul 6) Ancho 7) Cacahuacintle



La asociación de una alta densidad de los granos con una mayor predominancia de una forma poliédrica del gránulo de almidón puede deberse a que las células del endospermo, donde se localizan los gránulos, están empaquetadas de una forma más comprimida por lo que los gránulos adquieren una forma más poligonal y tienen una densidad más alta, como en los maíces Mezcla de Híbridos e Hidalgo y a diferencia del Cacahuacintle y Ancho que por ser menos densos sus gránulos no están tan cercanos el uno del otro y no pierden su forma redonda. Además White (2003) reporta que los gránulos cercanos al germen tienden a presentar una forma poligonal debido a que están más apretados. La forma del gránulo ha sido asociada también a la carga genética de la variedad del cereal, a la bioquímica del amiloplasto y a la fisiología de la planta (Svegmark y Hermanson, 1992).

El diámetro de los gránulos osciló entre 8 y 25 μm lo que coincide a lo expuesto en otros informes. Al hacer acercamientos con el microscopio electrónico de barrido se alcanzaron a percibir poros sobre la superficie de los gránulos. La presencia de poros, además de surcos en la zona ecuatorial, han sido reportados por Hoover en 2001 y Srichuwong en 2005.

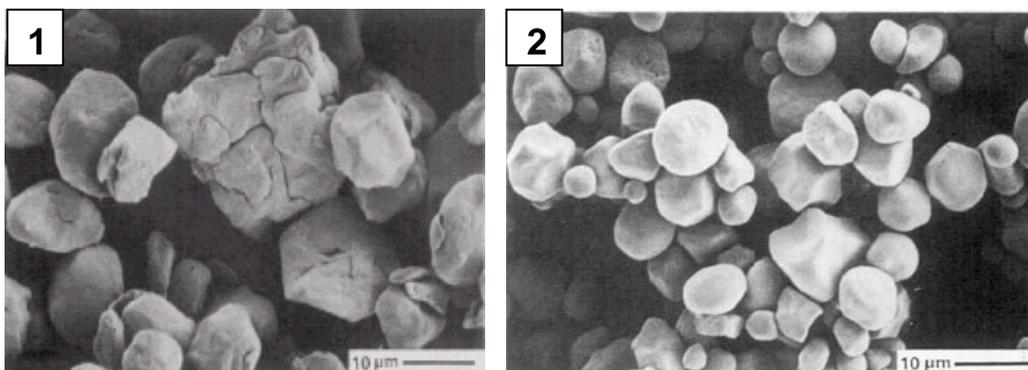


Figura 11. Almidones extraídos de maíz con diferentes grados de daño mecánico por molienda según Tester *et al.*, 1994. 1) Almidón con 25 % de daño mecánico 2) Almidón con 1-2% de daño mecánico

En la figura 11 se pueden ver las micrografías de almidones de maíz con daño mecánico del 25 y de 1-2% respectivamente. Los diferentes tipos de daño mecánico que se pueden ver son fracturas, grietas y aglomeraciones debido al trabajo mecánico ejercido sobre los gránulos. Si se comparan estas imágenes con las obtenidas para los criollos estudiados se puede concluir que los almidones extraídos no sufrieron un daño mayor al 5%. Esto es muy importante por que el daño en los gránulos modifica varias de sus propiedades térmicas, reológicas y de hinchamiento como por ejemplo aumentar excesivamente la absorción de agua y solubilidad, reducir la cristalinidad del gránulo y producir una masa que se adhiere con facilidad, entre otras.

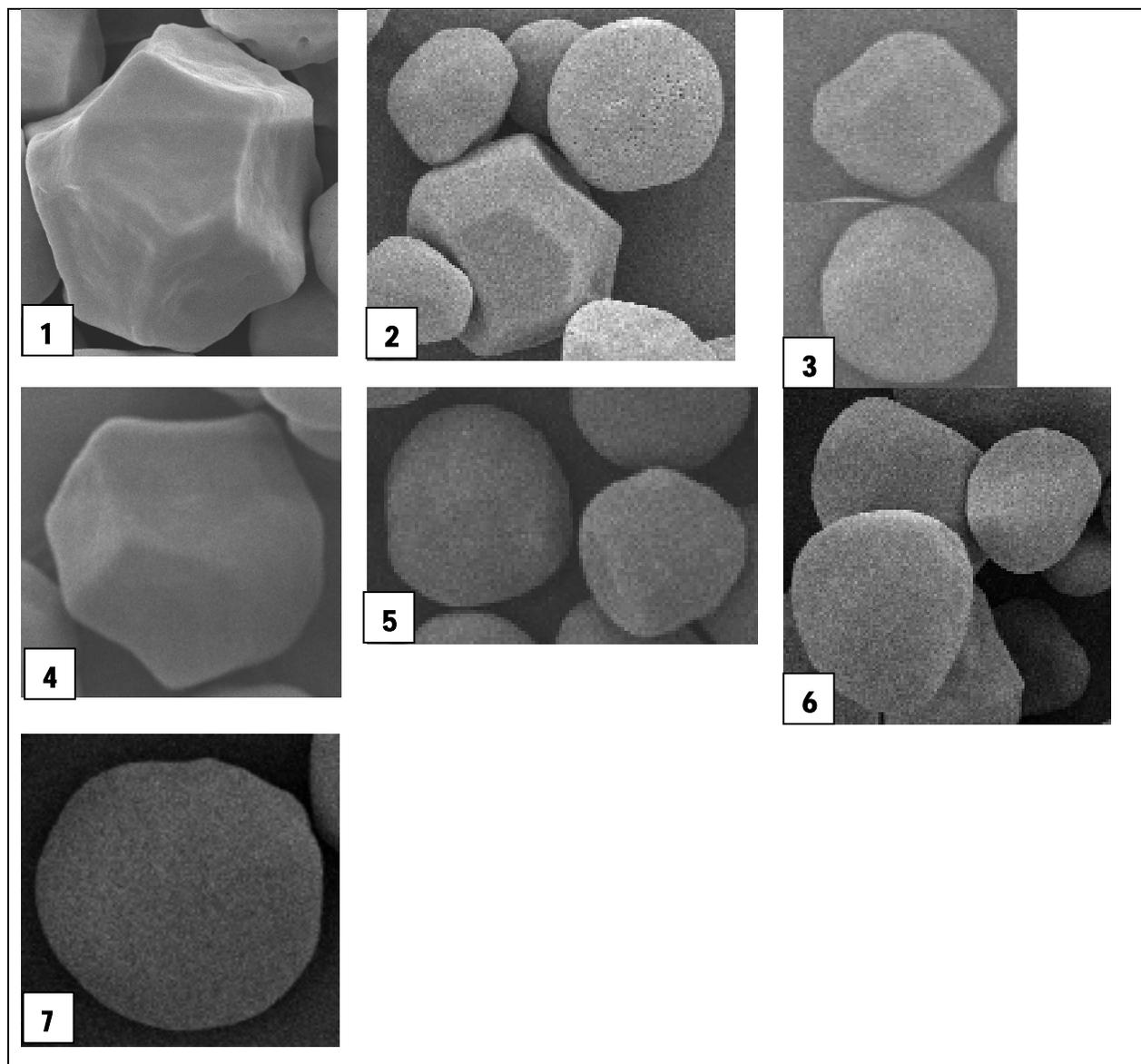


Figura 12. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) de almidones extraídos de varias muestras de almidones criollos y una muestra de maíz híbrido (x2000 y 10 kV). 1) Mezcla de maíz Híbrido 2) Hidalgo 3) Negro 4) Chalqueño 5) Tultepec 6) Ancho 7) Cacahuacintle

En la figura 13 a un mayor aumento (x6500) se puede observar la MEB de la harina de maíz Chalqueño. Se nota muy claramente cómo los gránulos se encuentran cubiertos por la matriz proteínica del endospermo además diversas partículas como carbohidratos y proteínas sobre la superficie de los gránulos (Singh, 2003). En el proceso de extracción



del almidón se remueve la matriz proteínica y la mayoría de los diversos compuestos adheridos a su superficie.

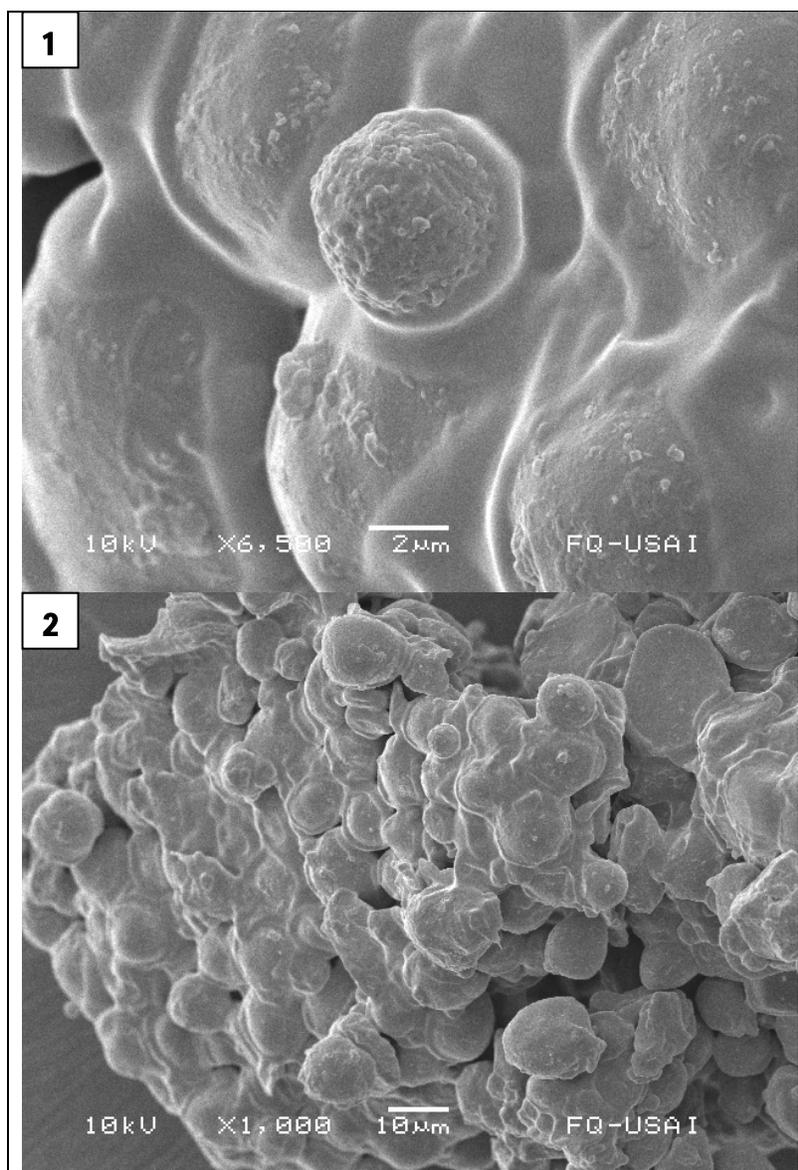


Figura 13. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) de almidones extraídos de varias muestras de almidones de maíz. 1) Gránulos de almidón Chalqueño dentro de matriz proteica (X6500, 10 kV) 2) Gránulos de almidón Chalqueño dentro de matriz proteica (X1000, 10 kV)



5. Calorimetría diferencial de barrido (CDB)

Las propiedades térmicas del almidón son de gran utilidad para comprender su funcionalidad a mayor cabalidad, debido a que en muchos de los usos alimentarios son sometidos a calentamientos diversos, como por ejemplo, en la elaboración de masa nixtamalizada y de atoles, entre otros. Durante el calentamiento del almidón en presencia de agua, ocurre el fenómeno de la gelatinización, el cual puede monitorearse en sus parámetros más importantes mediante la Calorimetría Diferencial de Barrido. Las temperaturas de los parámetros de gelatinización pueden ser consideradas como el reflejo térmico de la facilidad con la cual el agua penetra los gránulos de almidón generando la hidratación de las dobles hélices y por lo tanto de la disociación de ellas (Qi X., *et al.*, 2004).

En una extensa revisión de literatura del tema, no han sido encontrados reportes previos para estas mismas variedades de maíces criollos, de ahí la importancia de tales estudios. Aunque existen algunos reportes de otras variedades de maíces criollos, la mayoría de las investigaciones se han avocado a variedades híbridas comerciales.

El maíz ha sido ampliamente estudiado por diversos grupos alrededor del mundo y principalmente en grupos de los Estados Unidos, Argentina, India y otros países; sin embargo los criollos mexicanos, es decir las variedades sembradas y conservadas en México, cuentan con una investigación escasa. Algunas variedades nativas mexicanas han sido investigadas pero sólo las que han presentado características útiles para el mejoramiento del germoplasma presente en su país y recientemente seleccionando variedades útiles para sus industrias, lo cual no deja de ser valioso sin embargo no apoya la necesaria comprensión de la diversidad mexicana de maíces y sus productos entendiéndola en su contexto.

Los almidones de seis muestras de maíces criollos y la de maíz híbrido fueron analizados para estudiar la relación de sus parámetros de gelatinización con su contenido de amilosa y amilopectina para discutir un posible vínculo con sus usos potenciales. Las muestras exhibieron dos picos o señales que indican dos transiciones térmicas de naturaleza endotérmica, es decir, el almidón absorbió calor al gelatinizarse por lo que en el eje X de las gráficas se registra el flujo de calor endotérmico en mW (mJ/s). La primer señal registrada entre la temperatura de 60-75 °C corresponde a la transición térmica de la amilopectina, y la segunda no tan marcada se ubicó entre la región de 80-105° C, que corresponde a la separación de los complejos amilosa-lípidos presentes en el gránulo (Tziotis, *et al.*, 2005). En la figura 14 se observa uno de los termogramas obtenidos exhibiendo la usual forma así como las transiciones térmicas de la amilopectina y de la amilosa.

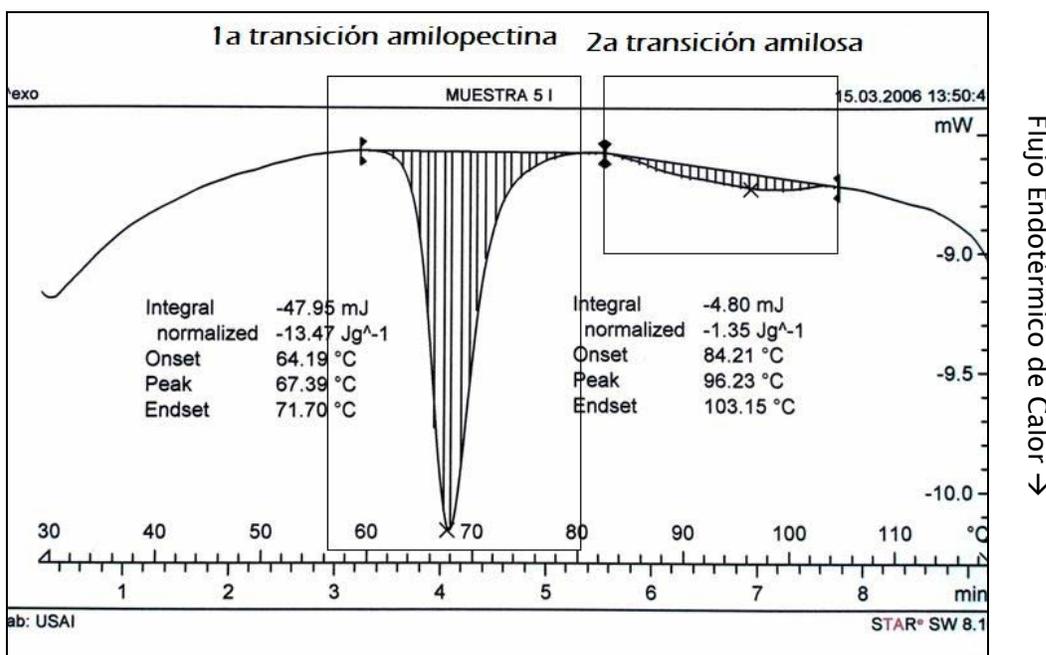


Figura 14. Termograma tomado con Calorimetría Diferencial de Barrido, donde se observan las transiciones de la amilopectina y la amilosa



PICO 1

a) Parámetros de Temperatura de inicio (Ti), de pico (Tp), y de finalización (Tf)

Todos los parámetros determinados exhibieron diferencias significativas ($p > 0.01$), lo que representa una existencia importante de variabilidad dentro de los criollos analizados. Los valores de Ti, Tp y Tf variaron de 62.5-65.6, 66.2-69.3 y 70.5-73.6, respectivamente (Tabla 14). La diferencia entre el valor mayor y el menor en todos los casos fue de 3.1° C. Los termogramas se pueden ver la figura 15 (todos los termogramas se muestran en el apéndice A).

Tabla 14. Parámetros de gelatinización para pico 1 obtenidos por calorimetría diferencial de barrido de almidones extraídos de maíces criollos y una mezcla de híbridos

Muestra	Ti* (°C)	Tp* (°C)	Tf* (°C)	Intervalo Tf-Ti*	ΔH^{**} (Jg ⁻¹)	ΔH_{amp} **(Jg ⁻¹)	ITP**
Cacahuacintle	64.1 b	67.4 b	71.7 b	7.6 a	13.5 d	10.2 b	3.6 d
Ancho	64.7 c	68.5 c	73.5 cd	8.8 b	12.9 cd	10.0 b	2.9 ab
Azul	64.0 b	67.4 b	72.1 b	8.1 ab	12.7 bc	9.8 b	3.1 bc
Negro	65.3 d	69.1 cd	72.9 c	7.5 a	11.9 ab	9.2 a	3.2 c
Chalqueño	62.4 a	67.2 b	72.0 b	9.7 c	13.6 d	11.1 c	2.8 a
Hidalgo	65.6 d	69.3 d	73.6 d	7.9 a	11.2 a	8.7 a	2.8 a
Mezcla Híbridos	62.5 a	66.2 a	70.5 a	7.9 a	12.9 cd	10.1 b	3.2 c
Promedio criollos	64.3	68.1	72.6	8.3	12.6	9.8	3.1

Ti: Temperatura de inicio, Tp: Temperatura de pico, Tf: Temperatura de finalización, ΔH Entalpía de gelatinización por g de almidón (Jg⁻¹), ΔH_{amp} : Entalpía de gelatinización por g de amilopectina (Jg⁻¹), ITP: Índice de tamaño de pico.

Letras diferentes significan la existencia de diferencia estadística entre muestras.

* Diferencia estadística con $p > 0.01$

** Diferencia estadística con $p > 0.05$

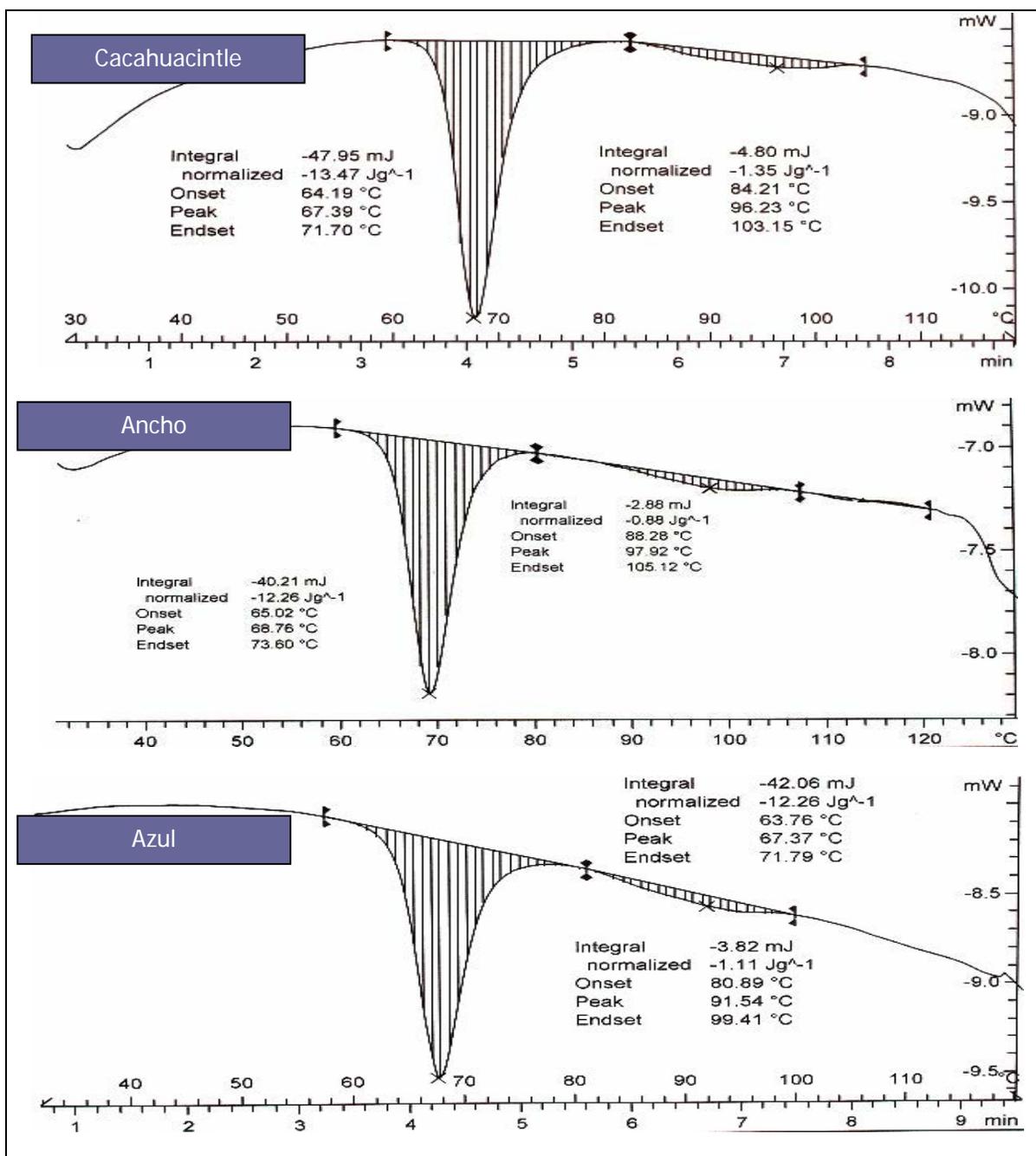


Figura 15. Termogramas de las muestras obtenidas por Calorimetría Diferencial de Barrido. Solo se muestra una de las 3 réplicas de cada muestra.

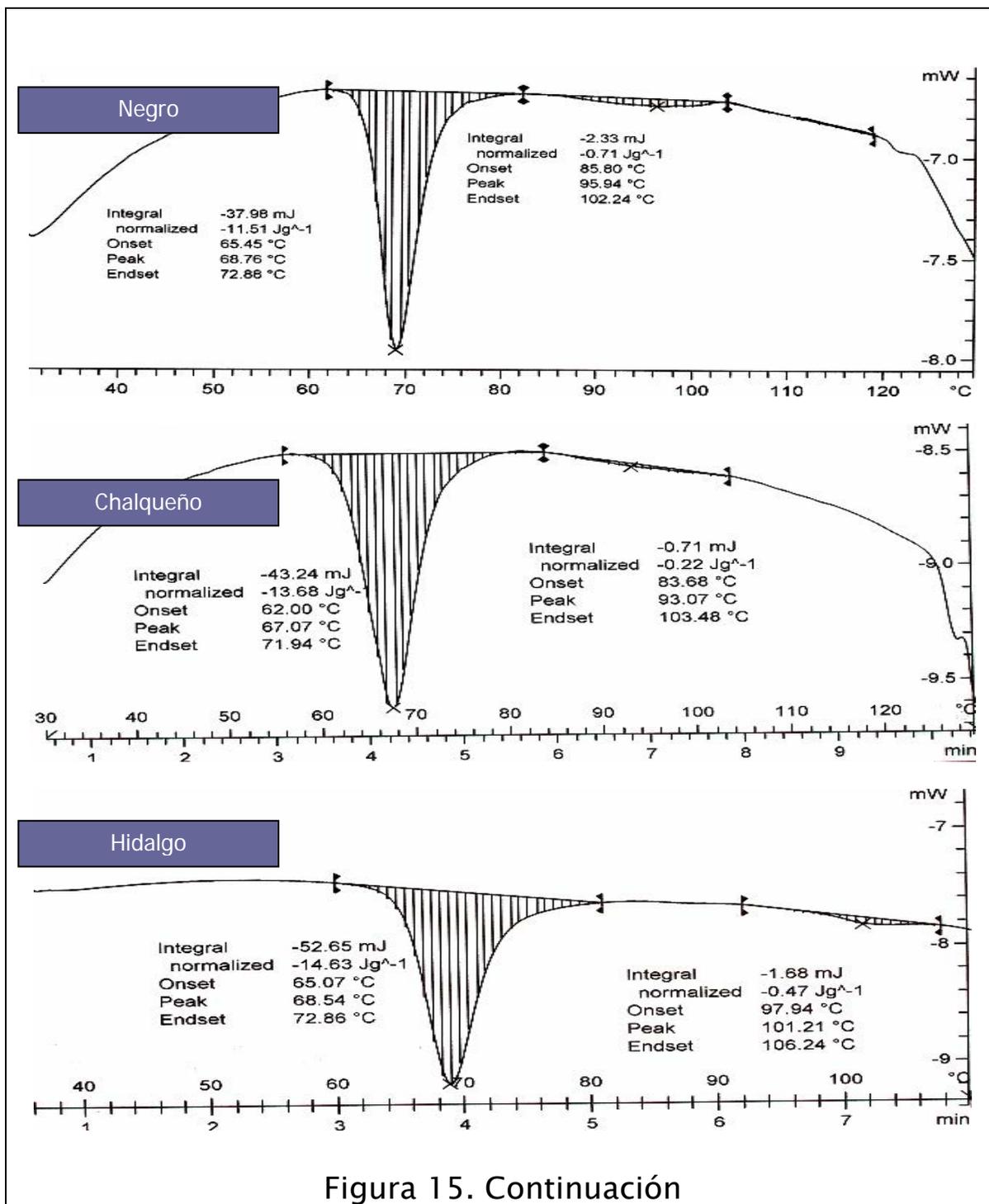


Figura 15. Continuación

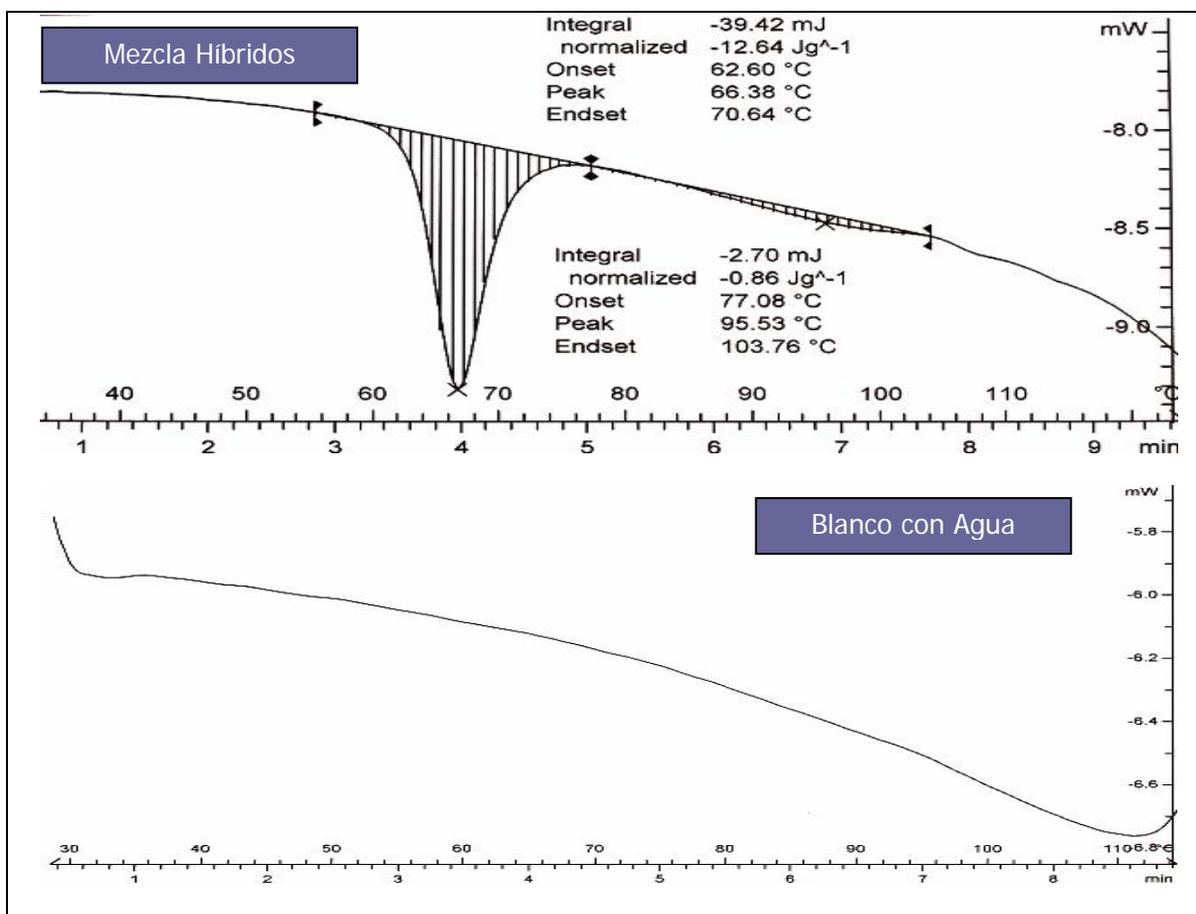


Figura 15. Termogramas de las muestras obtenidas por Calorimetría Diferencial de Barrido. Solo se muestra una de las 3 réplicas de cada muestra.

b) Temperatura de inicio (Ti)

La T_i es la temperatura a la cual el orden cristalino del almidón empieza a disminuir por la separación de los enlaces entre los hidrógenos de las unidades de glucosa adyacentes debido a la entrada de moléculas de agua, y por lo tanto marca el inicio de la gelatinización por lo que se inicia el hinchamiento de los gránulos y la salida del gránulo moléculas de amilosa y algunas de amilopectina según lo reportado por Tester y Morrison (1990). Este proceso no ocurre espontáneamente sino que requiere energía en forma de calor, por lo que es un fenómeno endotérmico. Los almidones del maíz Chalqueño y la



Mezcla de Híbridos tuvieron los valores más bajos (62.4 y 62.5 °C respectivamente) y los más altos fueron para el Negro e Hidalgo (65.3 y 65.6 °C respectivamente). Se puede observar por lo tanto que el almidón de la Mezcla de Híbridos y el Chalqueño fueron los primeros en iniciar la gelatinización, lo cuál puede representar una ventaja, por ejemplo, al tener una T_i baja se puede reducir los gastos de energía y las pérdidas de nutrientes y sabor asociadas a las altas temperaturas y eventualmente asociados al almidón (Tziotis *et al.*, 2005).

En el estudio de las propiedades de gelatinización del almidón es necesario tener en cuenta que las condiciones de crecimiento y de procesamiento pueden modificarlas, sin embargo uno de los principales factores que determina la T_i y que ha sido estudiado es la longitud de las cadenas de la amilopectina y principalmente de las cadenas de ramificación. Jane *et al.*, en 1999 determinaron experimentalmente que la temperatura de la gelatinización se incrementa al aumentar la longitud de cadena de las ramificaciones de la amilopectina. Debido a que estas cadenas son las principales partícipes en la formación de las regiones cristalinas, al ser mas largas establecen mayores interacciones y fortalecen los cristales, y por lo tanto la T_i aumenta (Ji *et al.*, 2003; Tziotis, *et al.*, 2005; Srichuwong *et al.*, 2005), por lo que se puede decir que los maíces Chalqueño y Mezcla de Híbridos al tener una T_i baja respecto a las demás muestras (62.4 y 62.5°C respectivamente) podría pensarse que poseen cadenas de amilopectina más pequeñas, mientras que los almidones del Negro e Hidalgo presentaron una T_i de 65.3 y 65.6°C podría deberse a la presencia de cadenas de amilopectina más largas, haciendo que la estructura cristalina del gránulo sea más estable, y por lo tanto, que empiece a gelatinizar a mayores temperaturas por que como se explica renglones arriba cadenas largas forman estructuras cristalinas con mayores interacciones y por tanto requieren mayor energía para ser separadas. Al mismo tiempo, otros factores subyacentes al tamaño del gránulo



como el tamaño de los cristales, área superficial y el contenido de lípidos, pueden afectar la Ti (Ji *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2003).

Los valores de Ti reportados en este estudio coinciden con valores para Ti de otras publicaciones obtenidos mediante el mismo método y condiciones, como por ejemplo White *et al.*, que en 1990 consiguieron valores de Ti entre 60 y 65 °C para la mayoría de las muestras analizadas, aunque también encontraron maíces con $Ti < 59^{\circ}\text{C}$ (3%) y $Ti > 65^{\circ}\text{C}$ (35%), concluyendo que en el maíz existe una alta variabilidad inter e intra-poblacional. Así mismo Li *et al.*, en 1994 estudiaron 35 almidones extraídos de poblaciones de maíces cultivados en zonas semi-tropicales y tropicales de México, Centroamérica, Sudamérica y el Caribe, obteniendo valores de Ti entre 64.3 y 69.6 °C. Las Ti de los criollos analizados caen en este intervalo, por ser maíces cultivados en zonas tropicales y subtropicales.

b) Temperatura de pico (Tp)

Para los resultados de Tp existió diferencia significativa ($p > 0.01$) y al igual que para la Ti existieron varios grupos estadísticos, de los cuales, en el valor extremo inferior se halló la Mezcla de Híbridos (6.2°C), y en el superior el Negro e Hidalgo (69.1 y 69.3 °C correspondientemente); mientras que en los grupos intermedios se hallaron los criollos Cacahuacintle, Ancho, Azul, Chalqueño y Negro. De hecho la tendencia en el orden de las Tp fue la misma que para la Ti, excepto para el maíz Chalqueño que se recorrió al segundo grupo y el Negro que para la Tp no tuvo diferencia estadística con el maíz ancho a diferencia de la Ti. Las temperaturas para los criollos coinciden por las reportadas por Ji *et al.*, en 2003 (66.1-71.6 °C). La Tp puede ser considerada como una medida de “calidad o perfección de las zonas cristalinas” (Tester y Karkalas, 1996), es decir habla acerca de la longitud de las dobles hélices formadas de la amilopectina en sus cadenas externas;



por lo que se puede sugerir que los criollos Negro e Hidalgo al tener las T_p más altas tienen las dobles hélices con mayor longitud en comparación a los demás criollos y a la Mezcla de Híbridos.

La T_f fue utilizada para el cálculo del intervalo de gelatinización.

d) Intervalo de Gelatinización

Los resultados para el intervalo de gelatinización oscilaron entre 7.5 y 9.7, lo que implica que la variación entre el dato mayor y el menor fue de 2.2 °C. Si hubo diferencias significativas en las muestras. El maíz Chalqueño consiguió el valor más amplio de todas las muestras analizadas (9.7 °C), mientras que el Negro fue el de menor intervalos (7.5 °C), aunque no mostró diferencia significativa con el Cacahuacintle (7.6°C), Azul (8.1°C), Hidalgo (7.9°C) y Mezcla de Híbridos (7.9°C). Así mismo, el ancho y el azul se ubicaron en el grupo intermedio estadísticamente significativo (8.8 y 8.1 °C respectivamente). El maíz Chalqueño puede ser mejor aplicado para procesos donde se cocine el almidón en etapas consecutivas, como en la elaboración de masa de nixtamal, por que debido a su amplio intervalo de gelatinización puede mantener estable su viscosidad en un intervalo mayor de temperaturas (Tziotis, *et al.*, 2005). Se halló una correlación de -0.791 ($p > 0.01$) (ver tabla de correlaciones en apéndice 2) entre el Intervalo de temperaturas de gelatinización y el contenido de amilosa, indicando que a mayor contenido de amilosa el intervalo disminuye.

e) Entalpía de Gelatinización (ΔH) y Entalpía de Gelatinización en base al contenido de amilopectina (ΔH_{amp})

La ΔH está asociada con la mayor cantidad de energía necesaria para gelatinizar los almidones y es una medida del grado de cristalinidad del almidón (Tester y Karkalas,



1996). La mayor ΔH fue para Cacahuacintle y Chalqueño con 13.5 y 13.6 J/g respectivamente, mientras que el valor más bajo fue para Hidalgo con 11.2 J/g. Por lo que los almidones del Cacahuacintle y el Chalqueño fueron los que más energía requirieron para ser gelatinizados. La explicación de estos resultados un tanto contrapuestos puede ser que mientras que para el Chalqueño el valor alto en la entalpía de gelatinización se debió principalmente a su mayor cantidad de amilopectina (18.5%) que para el Cacahuacintle (24.3%), el ΔH alto para el Cacahuacintle fue debido a sus cadenas de ramificación de su amilopectina más largas respecto a las del Chalqueño, lo que se nota en una T_i casi 2°C mayor del Cacahuacintle sobre el Chalqueño.

El Negro e Hidalgo fueron los almidones con el menor ΔH (11.9 y 11.2 Jg⁻¹ respectivamente), lo cual es una ventaja importante en la búsqueda de variedades que reduzcan el consumo de energía al ser utilizadas. El ΔH promedio de todos los criollos (12.6 Jg⁻¹) fue menor que el de la Mezcla de Híbridos (12.9 Jg⁻¹), lo que significa que de manera general los criollos presentaron menor cantidad de zonas cristalinas y esto debido a su contenido menor de amilopectina (77.9% y 22.1% de amilosa, ambos resultados son los promedios para los criollos), mientras que la Mezcla de Híbridos tuvo 78.6% de amilopectina y 21.4% de amilosa. El valor de ΔH puede ser utilizado por el sector industrial para la selección de variedades de maíz que gelatinicen sin tanto consumo de energía.

Dado que el fenómeno de gelatinización es básicamente una propiedad de la amilopectina (Tester y Morrison, 1990), el ΔH se puede recalculer con base en los contenidos de amilopectina de los almidones de las muestras en lugar de referirse al almidón. Los datos son mostrados en la tabla 14. Los resultados revelan que el Chalqueño obtuvo el mayor



valor estadísticamente significativo de los demás, lo que concuerda con su mayor contenido de amilopectina, lo anterior sugiere que a mayor contenido de amilopectina se puede esperar mayor energía necesaria para gelatinizar el almidón. Se encontró una correlación de Pearson importante entre el contenido de amilosa y amilopectina con el ΔH_{amp} de -0.551 y 0.546 respectivamente (ver tabla de correlaciones en apéndice 2). Lo interesante de esta cuestión es el signo de las correlaciones ya que indican que la amilosa disminuye el ΔH_{amp} y la amilopectina la aumenta. El ΔH_{amp} promedio del grupo de los criollos, a diferencia de los parámetros T_i , T_p , T_f e intervalo, fue menor comparado con la Mezcla de Híbridos (9.8 vs 10.1 Jg^{-1}_{amp}), de hecho al excluir al Chalqueño prácticamente todos los ΔH_{amp} de los criollos se ubicaron debajo del ΔH_{amp} de la Mezcla de Híbridos, esta observación, como se discutía anteriormente refuerza la posición de que los criollos de manera general presentan una tendencia a un menor contenido de amilopectina y mayor de amilosa, y/o menor cantidad de zonas cristalinas, aunque hay que considerar que sólo es un promedio, y que existen variedades como la de maíz Chalqueño con alto contenido de amilopectina.

f) Índice de Tamaño de Pico (ITP)

El Índice de Tamaño de Pico (ITP) es la relación entre la entalpía de gelatinización (ΔH) y el intervalo de gelatinización dividido entre dos, y es una medida de la uniformidad en la gelatinización (Sandhu, *et al.*, 2005). Es decir, dependiendo de la facilidad de acceso del agua al interior de las hélices dobles, la hidratación puede ocurrir de dos maneras distintas, al mismo tiempo (uniformemente) ó en un periodo largo de tiempo (no uniforme), y esto debido a la diferencia en el empaquetamiento cristalino de las dobles hélices del gránulo que impiden o facilitan la entrada de las moléculas de agua hacia el interior (Qi *et al.*, 2004). Debido a lo anterior un valor mayor significa una mayor uniformidad. En



nuestros resultados se observa que el Cacahuacintle obtuvo el mayor ITP (3.6) lo que indica una mayor uniformidad en su arquitectura cristalina, caso contrario al Chalqueño y al Hidalgo (2.8 ambos). Un ITP alto para el Cacahuacintle radicó en su bajo intervalo de gelatinización y a su alta entalpía de gelatinización, mientras que el valor bajo para el Chalqueño se debió a su gran intervalo de gelatinización. El ITP puede ser útil para referirse a la calidad del cocinado del almidón ya que como se ha dicho indica un desarrollo uniforme de la gelatinización. Además se obtuvo una correlación de 0.638 entre el ITP y el contenido de amilosa (-0.631 con la amilopeptina) –apéndice 2-, por lo que se puede sugerir que el contenido de amilosa genera una gelatinización uniforme. Tal vez debido a que al lixiviarse esta molécula durante la gelatinización va dejando espacios por donde penetra el agua para terminar de disociar las dobles hélices.

PICO 2

g) Parámetros de complejos amilosa-lípido

Este pico corresponde con la transición térmica ocurrida al separarse los complejos amilosa-lípidos presentes en los gránulos del almidón. Los lípidos que forman complejos de inclusión con la amilosa provienen de los lípidos presentes dentro del gránulo como fosfatidilcolina y fosfatidiletanolamina (aproximadamente son un ~0.7% del gránulo), y de trazas de lípidos no asociados al almidón que quedan después de la extracción del almidón y están compuestos principalmente de ácidos grasos libres (Belitz, 2004; Soulaka y Morrison, 1985).

La formación de estos complejos se da al establecer interacciones entre los fosfolípidos y los ácidos grasos y la amilosa, antes y durante el calentamiento y la gelatinización (Karkalas y Raphaelides, 1988; Eliasson, 1994, Tester, 1990 y Tziotis *et al.*, 2005). En el termograma de la figura 14 la segunda transición corresponde a la fusión de los complejos



de amilosa-lípidos. Estas transiciones han sido observadas en almidones de varias especies incluyendo el maíz.

Los resultados obtenidos son presentados en la tabla 15. El Cacahuacintle tiene la mayor entalpía endotérmica de 1.25 Jg^{-1} , mientras que el Chalqueño muestra la menor entalpía con tan solo 0.25 Jg^{-1} . Varias investigaciones han encontrado correlaciones significativas entre el ΔH_{com} (Jg^{-1} de almidón) y el contenido de amilosa en g amilosa/100 g almidón (Sasaki *et al.*, 1999), en los resultados de este estudio se observó una tendencia similar, el Cacahuacintle con un contenido de amilosa de 24.3% tuvo el mayor ΔH_{com} (1.25 Jg^{-1}) a diferencia del Chalqueño que con sólo 18.5% logró la menor ΔH_{com} (0.25 Jg^{-1}). Se halló una correlación con la amilosa de 0.638 lo que señala que a mayor amilosa el ΔH_{com} aumenta, tal como se ha comprobado experimentalmente por otros autores (apéndice 2).

Lo anterior demuestra que la influencia del mayor contenido de lípidos del Cacahuacintle, lo cual también está acorde con su alto contenido de amilosa (24.3%) entre las muestras estudiadas; y que puede ser determinante en las propiedades de textura que presenta este maíz al ser cocido. Parte importante de los lípidos presentes está en forma de fosfolípidos, aunque también hay ácidos grasos y monoacilgliceroles. Se ha reportado que los fosfolípidos tienen tendencia a formar complejos tanto con amilosa como con las cadenas de ramificación de la amilopectina largas (Singh *et al.*, 2003). Lo anterior, seguramente contribuyó a que el Cacahuacintle alcanzara el valor más alto de ΔH_{com} . Igualmente el Azul tuvo un ΔH_{com} alto lo que indica formación importante en cantidad del complejo amilosa-lípidos, debido tal vez a la presencia en gran cantidad de fosfolípidos y/o de cadenas largas de amilopectina y amilosa. El almidón con el mayor Ti fue Hidalgo indicando que entre sus complejos amilosa-lípido se encuentran asociados fuertemente.



Tabla 15. Parámetros térmicos de complejos amilosa-lípidos (pico 2) presentes en almidones extraídos de maíces criollos y una mezcla de híbridos obtenidas por calorimetría diferencial de barrido

Muestra	Ti* (°C)	ΔH_{com}
Cacahuacintle	84.0 ab	1.25
Ancho	90.8 b	0.72
Azul	80.8 ab	1.20
Negro	82.1 ab	0.51
Chalqueño	83.4 ab	0.25
Hidalgo	91.1 b	0.53
Mezcla Híbridos	77.6 a	1.01

Ti: Temperatura de inicio, ΔH_{com} : Entalpía de fusión de complejos amilosa-lípido (Jg^{-1} almidón). Letras diferentes significan diferencia estadística, $p < 0.05$.

h) Consideraciones Generales sobre la Gelatinización

Debido a la diferencia significativa encontrada entre los parámetros de gelatinización, estos parámetros en su conjunto pueden ser utilizados para diferenciar e identificar los diferentes genotipos de los criollos así como determinar su variabilidad en sus propiedades de gelatinización (Krueger *et al.*, 1987; White, 1990; Li *et al.*, 1994).

Qi *et al.*, (2004), señala que, además de su genotipo, las condiciones ambientales y principalmente la temperatura, bajo las que es sembrado el grano, afectan la estructura cristalina y arquitectura de los gránulos y por lo tanto sus parámetros de gelatinización. Además, White *et al.*, 1991 y Campbell *et al.*, 1992 han revelado que los efectos del ambiente, tales como la fecha de siembra, el lugar de sembrado y la precipitación, junto con la temperatura, pueden influenciar los valores de ΔH e intervalo. Las variaciones en los parámetros de gelatinización de estas muestras manifiestan por un lado las variaciones medioambientales intrínsecas y por el otro las de su carga genética. Debido a que los criollos son variedades adaptadas a las condiciones prevalecientes en su localidad o región donde se acostumbran sembrar y que presentan dificultad para



adaptarse a otras condiciones, es conveniente estudiarlos bajo las condiciones en que normalmente se siembran para enfocarse en sus usos potenciales, aunque se sumen mas factores a las causas de sus propiedades, en este caso de gelatinización. Considerando su contexto y no excluyéndolo, se podrá entender con más facilidad las posibles aplicaciones que pueden tener y los usos que actualmente se les da. Por otro lado, si se quiere entender el efecto del genotipo en sus propiedades sería necesario sembrarlos bajo las mismas condiciones para no tener efectos del ambiente y así evaluar el fenotipo resultante en condiciones controladas.

6. Propiedades de Absorción de Agua

El interés fue determinar el poder de hinchamiento (PH) de los almidones y harinas de maíz tanto a pH neutro como a pH alcalino. Como se mencionó en el capítulo anterior debido a la carencia de un método reportado que hubiera sido usado tanto a pH alcalino como neutro para la determinación del poder de hinchamiento y el porcentaje de sólidos solubles (SS), se llevaron a cabo dos experimentos para fijar las principales variables de la metodología en la determinación del poder de hinchamiento bajo esas dos condiciones de pH para las muestras de este estudio. En el primer experimento se estableció la cantidad de muestra (g), tiempo de calentamiento (min) y velocidad de centrifugación (número de gravedades) al momento de recuperar los sólidos solubles y el agua no absorbida. Para prevenir la desintegración de los gránulos y asegurar la obtención de un alto poder de hinchamiento, la temperatura de calentamiento se fijó en 80°C, ya que esa temperatura está por encima de las Tf de todas las muestras estudiadas (Tf mayor fue de 73.6 °C) y además es a 85°C cuando los gránulos empiezan a desintegrarse (Tester y Morrison, 1990). Con base en Tester y Morrison, 1990; Li, 2001 y Bryant y Hamaker,



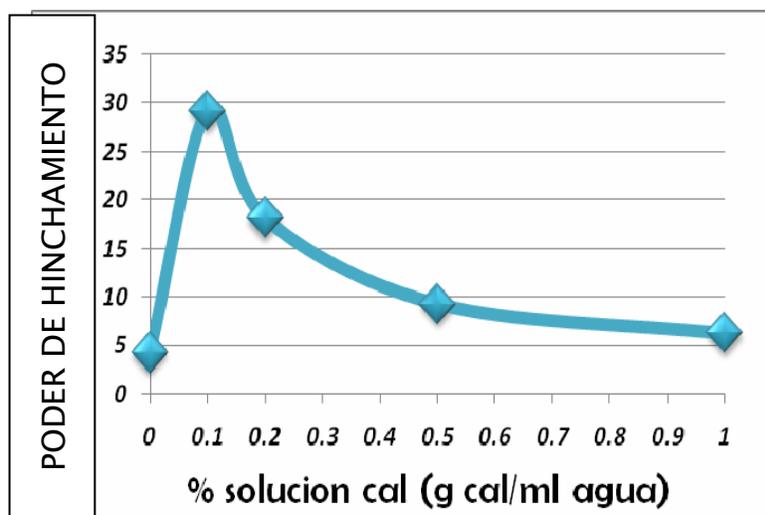
1997; se prefijó el volumen inicial de agua en 5 mL y el tiempo de agitación mientras se calienta la muestra en 2-3 segundos cada 10 minutos a velocidad media para evitar dañar demasiado los gránulos. Los parámetros de cantidad de muestra, tiempo y temperatura de calentamiento, velocidad de centrifugación, volumen de agua para gelatinizar y tiempo de agitación, se utilizaron en la determinación del PH y SS tanto en condiciones alcalinas como neutras. Los resultados del diseño experimental se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Resultado del diseño experimental para fijar variables de la metodología a usar en la determinación de poder de hinchamiento (PH) y % de sólidos solubles

Muestra (g)	PH	Tiempo (min)	PH	Velocidad Centrifugación (gravidades/15 min)	PH
0.1	9.9	20	9.9	1000	--
0.25	8.8	20	8.8	1000	--
	--	40	8.6	1000	--
0.5	7.4	20	--	1000	7.4
	--		--	2000	6.9

PH: Poder de Hinchamiento

Los números fuera de los paréntesis en cada columna fueron los PH resultantes al modificar la variable escrita en el encabezado manteniendo las demás variables constantes; entre paréntesis se indican las condiciones particulares. Un PH mayor fue preferible por que de esta manera las diferencias se acentúan más y por lo tanto son más perceptibles. Se realizó otro experimento para fijar la concentración de cal de la solución que se utilizó en la determinación de poder de hinchamiento alcalino (PH_{alc}) en el que se varió la concentración de cal desde 0% hasta 1% usando las demás condiciones antes señaladas. El resultado se puede apreciar en la gráfica 2.



Gráfica 2. Poder de Hinchamiento alcalino en almidón en función de la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la solución utilizada.

Los resultados obtenidos para el poder de hinchamiento en función de la concentración de cal, son similares a los obtenidos por Bryant y Hamaker en 1997, en donde obtuvieron la mayor retención de agua para una concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 0.1%. El valor de pH a esta concentración fue de 11.6. Bryant y Hamaker postularon que a bajas concentraciones la matriz del gránulo es “estirada” por el intercambio de protones H^+ , que presentan un tamaño pequeño, por iones Ca^{++} o CaOH^+ que tienen mayor tamaño y ocasionando el “estiramiento”; pero cuando la concentración de cal aumenta, la estructura del gránulo se estabiliza por el establecimiento de un mayor número de interacciones almidón-calcio produciendo un gránulo más rígido. Lo anterior hace esperar que la nixtamalización provoque un aumento en la capacidad de absorción de agua por parte del almidón, lo cual es una ventaja adicional de dicha tecnología.

Las condiciones finales usadas en la determinación del PH y SS se muestran en la siguiente tabla 17:



Tabla 17. Condiciones finales usadas para la determinación de poder de hinchamiento y % de sólidos solubles a condiciones neutras y alcalinas de almidones y harinas desengrasadas de maíces criollos

VARIABLE	PH y SS a pH Neutro	PH y SS a pH Alcalino
<i>Muestra</i>	0.5 g	0.5 g
<i>Tiempo calentamiento</i>	20 minutos	20 minutos
<i>Volumen agua usada para gelatinizar</i>	5 mL	5 mL
<i>Temperatura de calentamiento</i>	80°C	80°C
<i>velocidad de centrifugación</i>	1000 gravedades/15 min	1000 gravedades/15 min
<i>Velocidad de agitación</i>	2-3 segundos cada 10 minutos	2-3 segundos cada 10 minutos
<i>Concentración de Cal en el agua usada para gelatinizar</i>	0%	0.1%

Para el almidón céreo al determinar su PH y SS, se utilizó 0.05 g en lugar de 0.1 g, porque se observó en pruebas previas que esta muestra presentaba una alta absorción de agua, por lo que 5 mL se consideró como un volumen pequeño, con lo cual se limitaría su PH y se tendría un valor erróneamente bajo. Asimismo, después de centrifugar la muestra de de maíz céreo y vaciar el sobrenadante se notó la presencia de bastantes sólidos grumosos, como ha sido también reportado por Li y Yeh en 2001. Los resultados del almidón céreo se compararon con sus contrapartes los almidones normales para resaltar las diferencias en la absorción de agua debido a la variación en su relación amilosa-amilopectina.

El fenómeno del hinchamiento del almidón ocurre como parte de la gelatinización de los gránulos de almidón en exceso de agua. Al mismo tiempo hay pérdida del orden cristalino del almidón y se lixivia principalmente amilosa. El final del hinchamiento está dado por la desintegración del gránulo (Singh, 2003 y BeMiller, 2003). A manera general, los gránulos hinchados están conformados principalmente de amilopectina, mientras que la molécula,



más lineal, de amilosa se difunde hacia el exterior de los gránulos. Generalmente los almidones céreos se hinchan más que su contraparte normal por su alto contenido de amilopectina, mientras que la amilosa ha sido propuesta como un “diluyente” o inhibidor de las propiedades de hinchamiento de los gránulos de almidón (Tester y Morrison, 1997). Además se ha demostrado que los lípidos presentes en los gránulos tienen efectos sobre el hinchamiento y las propiedades de gelatinización del gránulo (White, 2003).

Tabla 18. Poder de hinchamiento y % de sólidos solubles en harinas y almidones a pH neutro.

<i>Neutro</i>	<i>PH Harina (g agua/g mta)</i>	<i>PH Almidón (g agua/g mta)</i>
Cacahuacintle	8.6 ± 0.1 a	15.2 ± 0.5 b
Ancho	11.6 ± 0.3 d	18.7 ± 0.2 e
Azul	10.2 ± 0.2 bc	13.3 ± 0.2 a
Negro	10.9 ± 0.7 cd	16.5 ± 0.8 c
Chalqueño	10.2 ± 0.4 bc	17.0 ± 0.4 c
Hidalgo	9.8 ± 0.5 b	17.8 ± 0.4 d
Mezcla Híbridos	11.1 ± 0.4 d	19.7 ± 0.5 f
Promedio criollos	10.2	16.4
Almidón Céreo	NA	31.9 ± 8.3

NA: No aplica

Letras iguales entre muestras significa que no existió diferencia significativa ($p > 0.05$)

← pH Neutro →

a) Poder de Hinchamiento en Almidón

Los resultados muestran que hubo diferencias significativas entre los almidones ($p > 0.05$) tabla 18. La Mezcla de Híbridos tuvo el mayor PH con 19.7 g/g seguido por Ancho con 18.7 g/g. Los valores mínimos fueron de 13.3 g/g y 15.2 para Azul y Cacahuacintle respectivamente. El hecho de que el Cacahuacintle y el Azul fueran las muestras que tuvieran los menores PH podría deberse a que presentan una mayor cantidad de



complejos amilosa-lípidos que inhiben el hinchamiento, ya que como se presentó en la sección de propiedades térmicas del almidón-pico 2, estos almidones alcanzaron los ΔH de fusión de complejos amilosa-lípidos más altos (1.25 y 1.20 Jg^{-1} respectivamente), por lo anterior mostraron los valores más bajos de PH entre las muestras. Además algunos autores han indicado la formación de complejos de lípidos con cadenas largas de amilopectina, de naturaleza diferente a los formados de amilosa, que también inhiben el hinchamiento del gránulo tal como ha sido reportado por Hoover, 2003 y Eliasson, 1994. Así pues, como en estas muestras se puede proponer la presencia de cadenas ramificadas de amilopectina más largas (ver parámetros de gelatinización-pico 1), esto podría pensarse que influye en los valores bajos de PH.

El PH muy elevado del maíz Ancho, podría explicarse por su bajo contenido de complejos amilosa-lípidos (0.72 Jg^{-1}). Otros factores pudieron ser las características de morfología y daño del gránulo (Hoover, 2001, Tester, 1990). A pesar de que la Mezcla de Híbridos presentó un ΔH_{com} de 1.01 Jg^{-1} para el segundo pico de los termogramas, lo que implica una alta formación de complejos amilosa-lípidos, comenzarían a fusionarse a partir de 77.6°C para este almidón, según se observa en la T_i del pico 2 obtenidos por DSC, y por ésto, no se impidió drásticamente la entrada de agua hacia el interior del gránulo. El maíz Chalqueño no exhibió un PH tan alto a pesar de contar con un contenido mayor de amilopectina sobre las demás muestras tal vez debido a diferencias estructurales de la amilopectina que afectaron negativamente en la absorción de agua. El almidón céreo, el cual está compuesto casi en su totalidad de amilopectina, tuvo un valor muy elevado (31.9 g/g) a pesar de que más de la mitad de la muestra se solubilizó. Esto demuestra que a mayor cantidad de amilopectina hay mayor absorción de agua. El poder de Hinchamiento promedio para almidones y harinas de criollos fue menor que para la mezcla de híbridos, lo cual se debe a que de manera general los criollos presentaron un contenido menor de



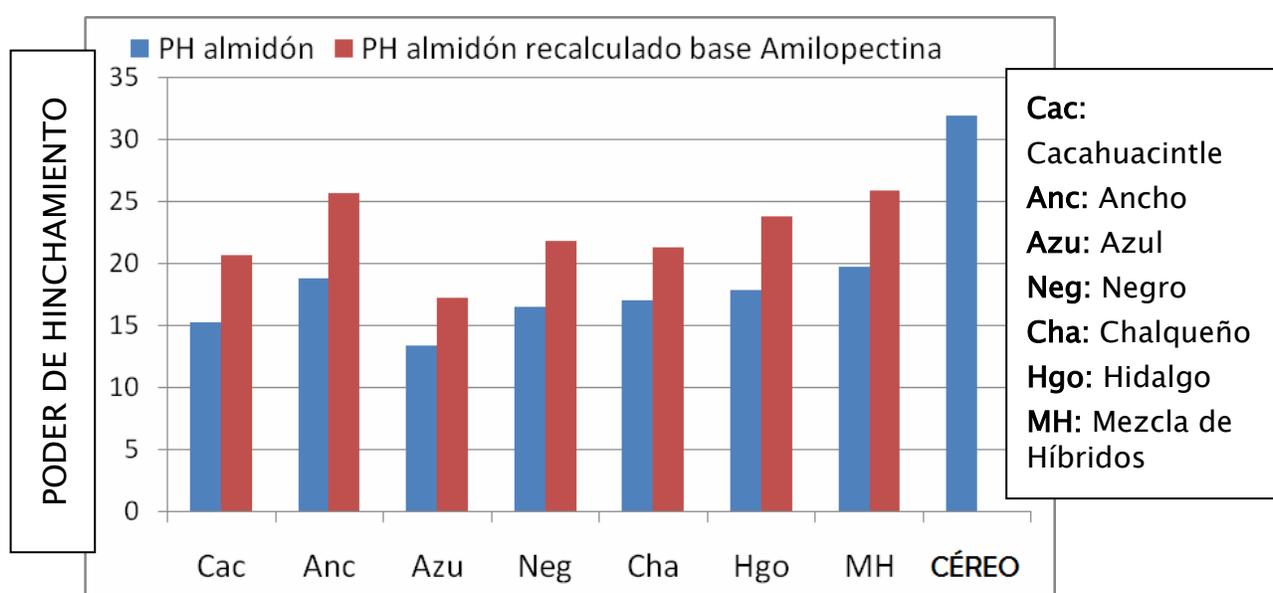
amilopectina y mayor de amilosa como se discutió en la sección de contenido de amilosa y amilopectina.

Como se esperaba, los PH para los almidones fueron superiores en comparación con los de las harinas debido a la presencia de otros compuestos como proteínas, celulosa, y minerales que absorben menor cantidad de agua que el almidón. Sin embargo entre el PH de almidones y de harinas hubo una correlación de 0.559 (apéndice 3) indicando moderada similaridad en el comportamiento.

Los PH a pH neutro fueron menores a los obtenidos a pH alcalino siendo esto esperado al incrementarse la absorción de agua por parte del hidróxido de calcio, como se discutió al principio de esta sección. No se encontraron correlaciones significativas con el contenido de amilosa y amilopectina entre las muestras de almidón (en la correlación se excluyó la muestra céro), a pesar de ello, la correlación encontrada con la amilosa fue negativa y con la amilopectina fue positiva, señalando un efecto de disminución del PH por parte de la amilosa, opuesto al de la amilopectina, el cual la aumenta. El no hallar una correlación significativa se debe a la complejidad tanto de la estructura y composición de los almidones como del fenómeno en sí (Li y Yeh, 2001), así como a la no tan marcada diferencia en los contenidos de amilopectina entre muestras (18.5 a 24.3%), en oposición al valor del maíz céro (>95% según se reporta en las especificaciones del producto). Así mismo, tampoco se hallaron correlaciones al recalcular los valores de PH con base en su contenido de amilopectina. Por otro lado los valores de PH recalculados con base en su contenido de amilopectina no alcanzaron el PH obtenido por el maíz céro de 31.9 g/g (Gráfica 6), indicando que la amilosa y los lípidos del almidón inhiben de manera importante el hinchamiento de los gránulos, así como que parte importante de la amilopectina se está liberando al medio conjuntamente con la amilosa (Tester y Morrison, 1990; Hoover *et al.*, 2003).



El poder de hinchamiento tiene implicaciones prácticas muy importantes ya que está relacionado con el rendimiento final del producto y con las propiedades reológicas y de textura finales de los productos basados en almidón (White, 2003; Karkalas, 1988). Debido a que los almidones Mezcla de Híbridos y Ancho tienen mayores PH pueden presentar mayores rendimientos y mejores texturas por que absorben mayor cantidad de agua, de manera opuesta a los almidones Azul y Cacahuacintle.



Gráfica 3. Poder de Hinchamiento y Poder de Hinchamiento recalculado con base en su contenido de amilopectina para almidones a pH neutro.

b) Poder de Hinchamiento en Harina

La muestra de harina con mayor PH fue Ancho y Mezcla Híbridos con 11.6 y 11.1 g/g respectivamente (Tabla 18). La muestra con menor valor fue Cacahuacintle con 8.6 g/g, seguido por Hidalgo (9.8 g/g), Azul, Chalqueño (ambos con 10.2 g/g) y Negro (10.9 g/g). Las muestras de harinas mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Los resultados reflejan el efecto conjunto del contenido de almidón y proteína principalmente (lípidos no presentes en las harinas ya que se usaron muestras



desengrasadas). El comportamiento de los resultados para PH de harinas fue relativamente similar al de los almidones de estas muestras, lo que se puede observar en una correlación de $r = 0.559$ entre el PH de harinas y almidones (apéndice 3). Haciendo un análisis más detallado considerando el orden de los PH para las harinas y almidones, se puede observar que la correlación relativamente baja fue causada principalmente por el cambio en el orden del Azul y el Hidalgo, ya que el lugar que ocupa el Azul dentro del orden de la harina es mayor que para el de los almidones, y para el Hidalgo fue opuesto:

MH > Anc > **Hg** > Cha ~ Neg > Cac > **Azu** Almidones

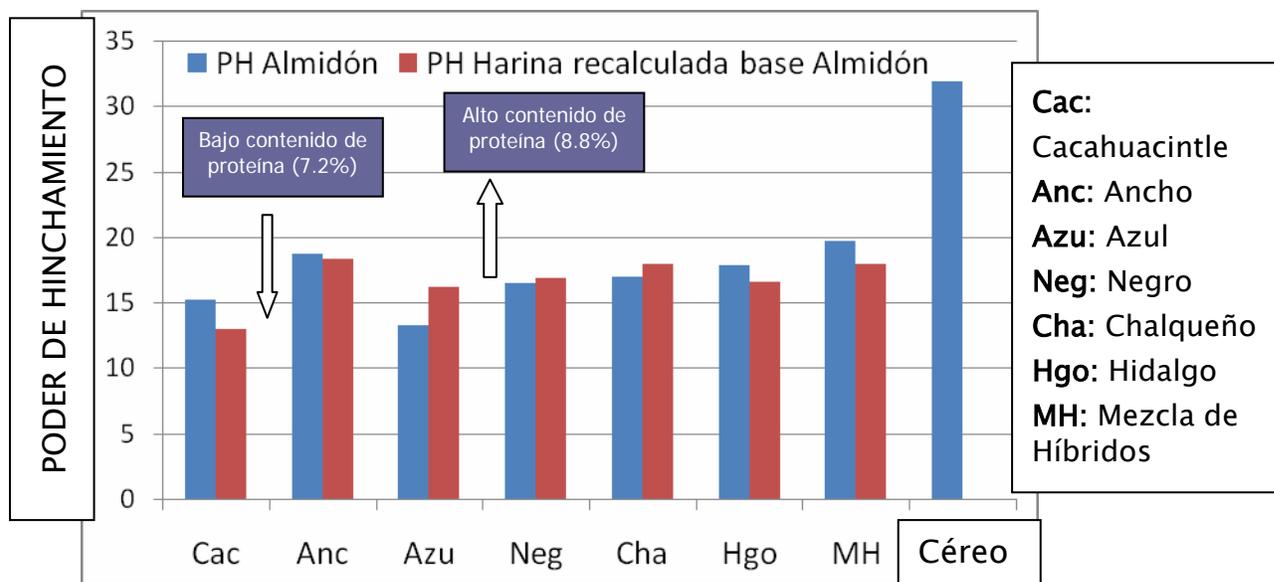
MH ~ Anc > Neg > **Azu** ~ Cha > **Hg** > Cac Harinas

Esto seguramente se debió a que el Azul tiene mayor cantidad de proteínas y almidón que el Hidalgo (8.8 y 66.2% en Azul versus 8.2 y 63.4% en Hidalgo) en la harina. Ya que las proteínas también tienen un efecto positivo en la absorción de agua (Robutti *et al.*, 2002). La harina de maíz ancho absorbió mayor cantidad de agua (11.6 g/g) probablemente debido a su alto contenido de almidón (67.4%) y su bajo nivel de formación de complejos amilosa-lípido dentro del gránulo de almidón ($\Delta H_{\text{com}} 0.72 \text{ Jg}^{-1}$).

Se recalcularon los PH con base en su contenido de almidón (Gráfica 7) para verificar si en las harinas el PH es esencialmente una propiedad del almidón y/o que tanto afectan los demás componentes. Los PH recalculados de las harinas del Cacahuacintle, Hidalgo y Mezcla de Híbridos estuvieron muy por debajo de su respectivo valor de PH para sus almidones; los del Ancho, Negro y Chalqueño fueron casi iguales y el del Azul se ubicó muy por encima del PH obtenido por su respectivo almidón en condiciones neutras. Si se considera que la harina del Azul tuvo la mayor cantidad de proteínas mientras que la del Cacahuacintle la menor y que existió una correlación entre el contenido de proteína y el



PH recalculado de $r = 0.503$, se puede sugerir que la absorción de agua por parte de las harinas también se ve afectada por el contenido de proteína, además del almidón. Así mismo hay que mencionar que la fibra soluble presente en las harinas también tiene un papel fundamental en la absorción de agua, pero como no fue determinada experimentalmente en las muestras no se puede ponderar su efecto.



Gráfica 4. Poder de Hinchamiento y Poder de Hinchamiento recalculado con base en su contenido de almidón para harinas a pH neutro. Flecha sentido abajo indica la muestra con menor contenido de proteína mientras que la flecha con sentido hacia arriba señala la de mayor contenido.

c) Porcentaje de Sólidos solubles en Harina y Almidón

Considerando el porcentaje de SS (%SS) (Tabla 19), las harinas tuvieron valores mayores de %SS que los almidones, salvo para el Cacahuacintle que su almidón tuvo mayor %SS que su harina.



Tabla 19. Porcentaje de Sólidos Solubles en harinas y almidones a pH neutro

<i>Neutro</i>	<i>%SS Har (g SS/100 g mta)</i>	<i>%SS Alm (g SS/100 g mta)</i>
Cacahuacintle	6.0 ± 0.4 a	7.1 ± 0.6 b
Ancho	11.7 ± 0.9 d	10.0 ± 1.2 c
Azul	8.0 ± 1.5 b	2.9 ± 0.2 a
Negro	11.0 ± 0.8 cd	8.6 ± 1.7 bc
Chalqueño	10.0 ± 0.3 c	7.1 ± 1.6 b
Hidalgo	9.8 ± 0.8 c	9.7 ± 0.5 c
Mezcla Híbridos	11.7 ± 1.0 d	9.6 ± 2.3 c
Promedio criollos	9.4	7.6
Almidón Céreo	NA	62.1 ± 8.1

NA: No aplica

Letras iguales entre muestras significa que no existió diferencia significativa ($p > 0.05$)

Existió para harinas y almidones (apéndice 3) una correlación entre su porcentaje de SS y su PH de 0.915 ($p > 0.01$) y de 0.904 ($p > 0.01$) respectivamente, indicando que el % de SS de harinas y almidones aumenta proporcionalmente conforme se incrementa su PH, es decir a mayor entrada de agua mayor liberación de sólidos solubles, como indicaron Tester y Morrison en 1990. Los valores de %SS para almidones (7.1 a 10.0 %) son superiores al valor determinado para maíz de 6% reportado por Tester y Morrison en 1990. Las diferencias en ambos estudios pueden deberse a variaciones en el método así como a presencia de almidón dañado, ya que estos investigadores no midieron el poder de hinchamiento sino el factor de hinchamiento, valores que a pesar de que son muy similares, muestran algunas diferencias en su cálculo, tal y como se expuso en el capítulo de metodología.

De manera general se puede decir que el comportamiento pudo deberse a la presencia de partículas fácilmente lixiviables en las harinas como fragmentos de germen (se utilizaron harinas desengrasadas por lo que no había aceite), proteína y otros carbohidratos



solubles como oligosacáridos y mono, di y trisacáridos (Belitz, 2004), además de amilosa, los cuales no se encuentran o sólo están en muy pequeñas cantidades en los almidones extraídos. El alto valor de SS para el almidón céreo sugiere que por alguna razón sus gránulos fueron muy sensibles a las condiciones del método; observaciones similares han sido reportadas por Li y Yeh en 2000. Esta sensibilidad por parte de los gránulos céreos, podría ser debida su alta capacidad para la absorción de agua, generando que sean particularmente susceptibles al movimiento y por consiguiente aumentando la fracción soluble o los SS.

Los almidones del maíz Azul y del Chalqueño que tuvieron los %SS más bajos (2.9 y 7.1%) fueron los que presentaron las evidencias de picos en la zona correspondiente a la formación de complejos amilosa-lípidos de forma más marcada, según se reporta en la sección de propiedades térmicas, y que como se ha dicho, estos complejos logran inhibir no sólo el hinchamiento, si no también la lixiviación de la amilosa, la cual constituye aproximadamente dos tercios de la fracción total de α -glucano lixiviada; así también hay otros factores tales como restricciones estéricas dentro del gránulo que impiden la salida de la amilosa y/o amilopectina (Tester y Morrison, 1990). De esta manera las muestras restantes con mayores %SS muestran evidencias térmicas de menores cantidades de complejos entre la amilosa y los lípidos. Todo lo anterior permite considerar que la cantidad de sólidos solubles está también afectada por la formación de complejos amilosa-lípidos, así como del contenido de lípidos. El contenido de SS para almidones no correlacionó significativamente ni con el contenido de amilosa, ni con el contenido de amilopectina, seguramente por los factores que se han discutido previamente (lixiviación conjunta de amilopectina y amilosa, presencia de partículas de almidón dañado, etcétera). Un contenido alto de sólidos solubles puede ser importante en productos donde la liberación de partículas hacia el medio sea esencial para el desarrollo de sus propiedades



sensoriales. En este caso la harina del maíz Ancho presentó un valor alto de SS conjuntamente con la Mezcla de Híbridos.

← pH Alcalino →

d) Poder de Hinchamiento en Almidón

Se determinó el “Poder de Hinchamiento alcalino” (PH_{AIC}) para los almidones criollos y de la Mezcla de Híbridos usando una solución de $Ca(OH)_2$ al 0.1% con diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) (Ver tabla 20 y gráfica 5). Es importante señalar que debido a su alta desviación estándar el resultado del maíz Ancho no se consideró en el establecimiento de los subgrupos estadísticos pero sí en el análisis de correlación. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 20. La Mezcla de Híbridos junto con Hidalgo fueron los que absorbieron menos agua y reportaron un PH_{AIC} más bajo (26.9 y 27.2 g/g) mientras que el Negro alcanzó el mayor PH_{AIC} de 30.4 g/g seguido por el Cacahuacintle (29.7 g/g). Los resultados son similares a los reportados por Sefa-Dedeh *et al.*, 2004. El maíz céreo mostró un PH de 43.2 g/g por lo que fue muy superior a sus contrapartes no céreas, lo que indica que, en condiciones alcalinas, el contenido de amilopectina también influye positivamente en la absorción de agua, inclusive con un muy alto nivel de solubilidad (62.1 %).

El fenómeno de absorción de agua en medio alcalino usando $Ca(OH)_2$, es un fenómeno complejo, aun no comprendido en su totalidad. Durante el cocido en presencia de hidróxido de calcio, debido a las condiciones fuertemente alcalinas ($pH > 11$), los iones OH^- remueven protones exteriores de las cadenas de almidón, otorgándoles carga negativa, por lo cual los iones Ca^{2+} forman enlaces cruzados con la molécula de almidón, estabilizando su estructura granular y provocando que se absorba mayor agua sin mostrar desintegración granular (Gómez *et al.*, 1992; Rodríguez *et al.*, 1996; Bryant y Hamaker,

1997; Mondragón *et al.*, 2005; Mendez-Montevalvo *et al.*, 2006). Lo anterior señala que la formación de enlaces cruzados en el Negro fue más efectiva para la retención de agua que para los almidones de Mezcla de Híbridos e Hidalgo.

Tabla 20. Poder de hinchamiento y % de sólidos solubles en harinas y almidones a pH alcalino (pH = 11.6)

<i>Alcalino</i>	<i>PH Har</i> <i>g agua/g mta</i>	<i>PH Alm</i> <i>g agua/g mta</i>	<i>%SS Har</i> <i>g SS/100g mta</i>	<i>%SS Alm</i> <i>g SS/100g mta</i>
Cacahuacintle	10.5 ± 0.3 a	29.7 ± 0.6 ab	9.6 ± 0.3 a	17.2 ± 1.8 a
Ancho	20.5 ± 7.7 ND	24.4 ± 10.4 ND	21.2 ± 0.2 cd	23.2 ± 2.5 b
Azul	17.7 ± 0.9 d	29.5 ± 1.9 ab	19.9 ± 1.0 bc	14.3 ± 1.2 a
Negro	18.5 ± 0.6 de	30.4 ± 1.4 b	21.2 ± 0.7 cd	18.5 ± 3.8 a
Chalqueño	16.6 ± 0.2 c	28.4 ± 0.2 ab	20.7 ± 1.3 cd	15.9 ± 0.2 a
Hidalgo	14.8 ± 0.2 b	27.2 ± 2.4 a	19.1 ± 1.2 b	16.8 ± 3.3 a
Mezcla Híbridos	18.8 ± 0.1 e	26.9 ± 0.8 a	21.6 ± 0.2 d	17.0 ± 0.9 a
Promedio criollos	16.4	28.3	18.6	17.6
Almidón Céreo	NA	43.2 ± 8.2	NA	71.8 ± 12.0

NA: No aplica, ND: No determinado

Letras iguales entre muestras significa que no existió diferencia significativa ($p > 0.05$)

A pesar de que las concentraciones de cal usadas en este estudio, 0.1% g Cal/ mL agua, no son iguales a las usadas en la nixtamalización, 0.34 – 0.4% g Cal/mL de agua (la concentración de cal respecto a la muestra es de 1% w/w) (Serna-Saldivar *et al.*, 1991), se espera que el comportamiento de los almidones en una nixtamalización sea de un modo similar a los mostrados aquí. De esta manera un PH_{AIC} se asocia con un mayor rendimiento, y por lo tanto es deseable.

En la tabla 21 se muestra el número de veces que aumentó el PH_{AIC} de cada almidón respecto a su PH_{Neu} :



Tabla 21. Índice de aumento del Poder de Hinchamiento para almidones a pH alcalino.

MUESTRA	ÍNDICE DE AUMENTO
Cacahuacintle	2.0
Ancho	1.3
Azul	2.2
Negro	1.8
Chalqueño	1.7
Hidalgo	1.5
M. Híbridos	1.4

En todas las muestras las condiciones de alcalinidad aumentaron el PH respecto al obtenido a pH neutro. Se distingue que el maíz Azul fue el que más veces aumentó (poco más del doble) seguido por el Cacahuacintle (el doble), mientras que el menor aumento se dió para el Ancho (1.3 veces) y Mezcla de Híbridos (1.4 veces). Esta diferencia se puede deber a variaciones en la estructura molecular del almidón (principalmente de la amilosa) que favoreció la formación de enlaces cruzados con el calcio y la retención de agua. Se puede decir que la cal, a una concentración de 0.1 %, aumentó el ingreso y la retención de agua en el interior del gránulo.

Por otro lado entre PH_{Alc} y PH_{Neu} se encontró una correlación significativa (apéndice 2) de -0.726 ($p > 0.05$). Esta correlación negativa hace mención a un comportamiento inverso del fenómeno de hinchamiento a pH alcalino del neutro, es decir los almidones que a pH neutro tuvieron los valores de PH más altos, a pH alcalino alcanzaron los más bajos y viceversa. Como se observa enseguida, ésto está relacionado con la amilosa y su contenido. Acorde a lo que reportan algunos autores (Jackson *et al.*, 1988; Gómez *et al.*, 1992; Mondragón *et al.*, 2004; Trejo-Gonzalez *et al.* 1982) durante el calentamiento alcalino la amilosa reduce su solubilidad, adquiere carga negativa, por causa de los iones OH^- que le quitan protones y lo ionizan, y establece enlaces cruzados con los iones Ca^{2+} .



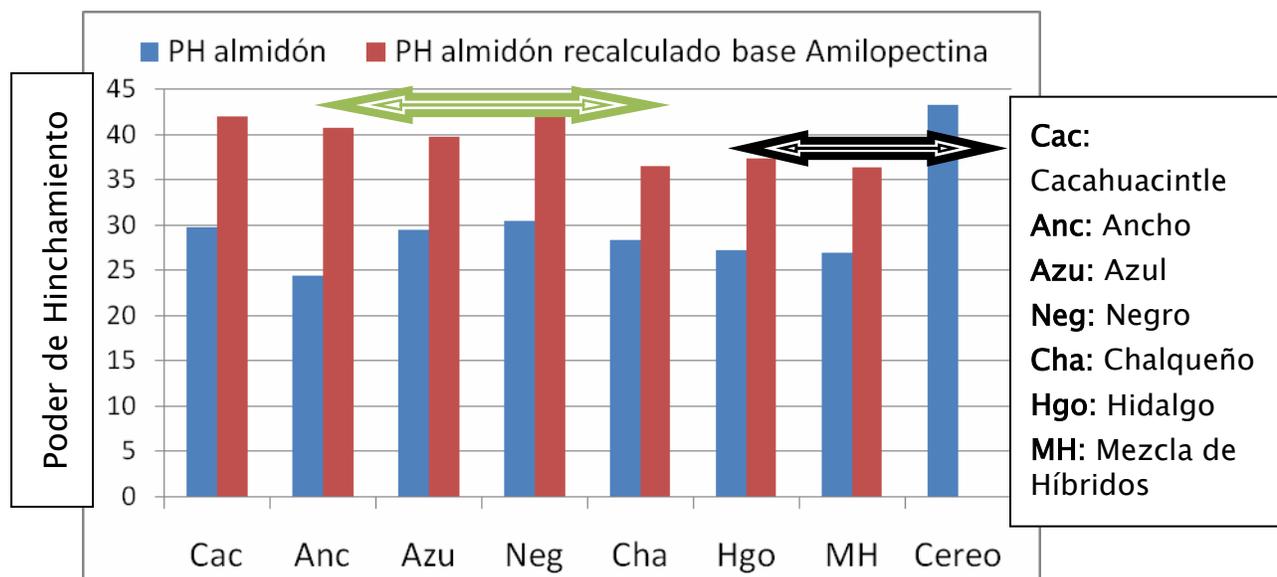
De esta manera la amilosa favorece la retención de agua y del hinchamiento (todo esto para concentraciones de calcio menores al 0.2%), por lo que se encontró una correlación inversa a los obtenidos bajo pH neutro, donde la amilosa, como se demostró restringe la entrada de agua (Tester y Morrison, 1990). Fue debido a la influencia positiva en la absorción de agua por parte de la amilosa y a que los almidones de criollos contienen más amilosa, que éstos tuvieron un poder de hinchamiento promedio superior al de la Mezcla de Híbridos (ver gráfica 5).

Ya que la absorción de agua aun en condiciones alcalinas se ve afectada positivamente también por la amilopectina se recalcularon los PH_{AIC} con base en el contenido de amilopectina de cada muestra de almidón, y se halló una correlación estadísticamente significativa entre este valor de PH_{AIC} recalculado con base en el contenido de amilopectina y el contenido de amilosa de cada almidón de $r = +0.720$ ($p > 0.05$). Esto apoya las ideas discutidas anteriormente. El valor positivo de r se puede interpretar como que la amilosa (o algún arreglo de ella, quizás los complejos amilosa-lípido u otro que interaccione con los iones formados por la cal) bajo condiciones alcalinas, $[Ca(OH)_2] = 0.1$ % en este caso, favorece la retención de agua y del hinchamiento mediante el establecimiento de enlaces cruzados y la consecuente formación de una estructura de gel. Una inspección visual de la cocción alcalina, mostró que tenían una consistencia gelatinosa firme y eran más resistentes a la manipulación que las que se cocinaron a pH neutro; lo que refuerza las ideas arriba mencionadas.

En la gráfica 5 se puede observar que para los almidones con mayor contenido de amilosa (muestras debajo de la flecha verde), su PH recalculado en base a su contenido de amilopectina casi igualó el valor de PH_{AIC} obtenido por el maíz céreo, mientras que los almidones con mayor contenido de amilopectina (muestras debajo de la flecha negra) se quedaron muy por abajo. Esto puede explicarse diciendo que en la cocción alcalina una



mayor proporción de amilopectina es solubilizada, según reportan Jackson *et al.*, en 1988 y que la amilosa contribuyó a aumentar la capacidad de retención de agua, tal cual se discutió arriba.



Gráfica 5. Poder de Hinchamiento y Poder de hinchamiento recalculado con base en el contenido de amilopectina para almidones en condiciones alcalinas. La flecha a la izquierda señala los maíces con mayor contenido de amilosa mientras que la de la derecha almidones con mayor contenido de amilopectina.

e) Poder de Hinchamiento en Harina

Se cuantificó el poder de hinchamiento alcalino en harinas (PH_{Alc}) y se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) (Ver tabla 20). Para que no se viera afectado el análisis estadístico de rangos múltiples se excluyó al maíz Ancho, ya que debido a su alta desviación estándar no permitía distinguir los subgrupos estadísticamente iguales mediante prueba de Duncan. El PH_{Alc} en harinas varió desde 10.5 hasta 24.9 y se reconocieron 5 subgrupos homogéneos. El Cacahuacintle fue el menor con 10.5 g/g, seguido por Hidalgo con 14.8 g/g, Chalqueño 16.6 g/g, Azul 17.7 g/g y finalmente Negro y Mezcla de Híbridos con 18.5 y 18.8 g/g respectivamente. El valor promedio del Ancho fue



superior a todos (20.5 g/g). Los resultados de PH_{alc} fueron mayores a los obtenidos en medio neutro, lo que demuestra el efecto del álcali de aumentar la capacidad de absorción del agua por parte de las harinas debido al efecto de los iones calcio en el gránulo. Sin duda alguna la alta absorción de agua de las harinas a pH alcalino se debió al hinchamiento del almidón, el cual es el constituyente mayoritario de estas (Gómez *et al.*, 1992). La correlación fuerte existente entre el PH_{Neu} y PH_{Alc} de las harinas ($r = 0.979$, $p > 0.01$), revela que el comportamiento de hinchamiento de las harinas a pH alcalino es similar a la forma en que se hincharon las harinas a pH neutro. Así mismo no existió correlación significativa entre PH_{Har} y PH_{Alm} alcalinos ($r = -0.470$) indicando que el comportamiento de la harina es diferente al que presentó el almidón aislado. Esto se pudo deber a la presencia de la matriz celular de naturaleza proteínica que limitó el hinchamiento del almidón y por lo tanto el desarrollo cabal de las propiedades del almidón en condiciones alcalinas (Gómez, 1992). Como se observa en la sección de Microscopia electrónica de Barrido, la matriz cubre los gránulos de almidón manteniéndolos agrupados en la harina.

f) Porcentaje de Sólidos solubles en Harina y Almidón

Se determinó el porcentaje de Sólidos solubles en medio alcalino para los almidones (Tabla 20). El conjunto de los valores fueron superiores, más de dos veces a los obtenidos para almidones a pH neutro. Para la muestra de maíz céreo también se obtuvo un porcentaje de SS muy alto (71.8 %) en comparación con las demás muestras en las mismas condiciones de pH y con ella misma pero a condiciones neutras. Los resultados anteriores se deben a que hay mayor ruptura de fragmentos de almidón por efecto de las condiciones alcalinas (Bryant y Hamaker, 1997) y a que la estructura del gránulo es más susceptible a un eventual daño mecánico al estar más hinchado, además de que la



solubilidad de la amilopectina aumenta, tal como ha sido reportado por Jackson *et al.*, (1988) y por Bryant y Hamaker (1997). Estos últimos han sugerido que los mayores valores de solubilidad de almidón se alcanzan a una concentración de cal alrededor de 0.2%.

Se encontró una correlación de -0.659 entre %SS con el PH_{Alc} de almidón (apéndice 2). Esta relación inversa indica que las muestras que tuvieron mayor poder de hinchamiento en condiciones alcalinas liberaron menos sólidos solubles al medio, lo cual pudo ser debido a que esos almidones establecieron una mayor cantidad de enlaces entrecruzados con la amilosa y el ion calcio lo cual dificultaría su lixiviado hacia el exterior. Jackson *et al.*, (1988) reportó que al cocer almidón con Oxido de Calcio a niveles bajos de concentración (~0.08%) la solubilidad de la amilopectina aumentó mientras que la de la amilosa disminuyó respecto al almidón sin CaO. Además sugieren la formación de compuestos Calcio-almidón y Calcio-Amilosa unidos por enlaces entrecruzados, así como la ocurrencia de cambios conformacionales en el almidón. Esto también fue confirmado por Gómez *et al.*, (1992), quienes detectaron en sus investigaciones un aumento en la solubilidad del almidón y de la amilopectina al calentarse en medio alcalino. Considerando toda la discusión anterior se puede entender por qué el maíz céreo (en su mayor parte amilopectina) mostró más de un 70% de sólidos solubles. Además, Gómez *et al.*, (1982) reportaron el establecimiento de interacciones entre amilosa-lípidos con la consecuente formación de complejos que disminuyen la solubilidad de la amilosa y contribuyen a la formación de las propiedades del nixtamal; por lo que la formación de una fracción de amilosa altamente insoluble al ser cocido con $Ca(OH)_2$ puede contar para la rápida formación de la masa de nixtamal y para las tortillas.

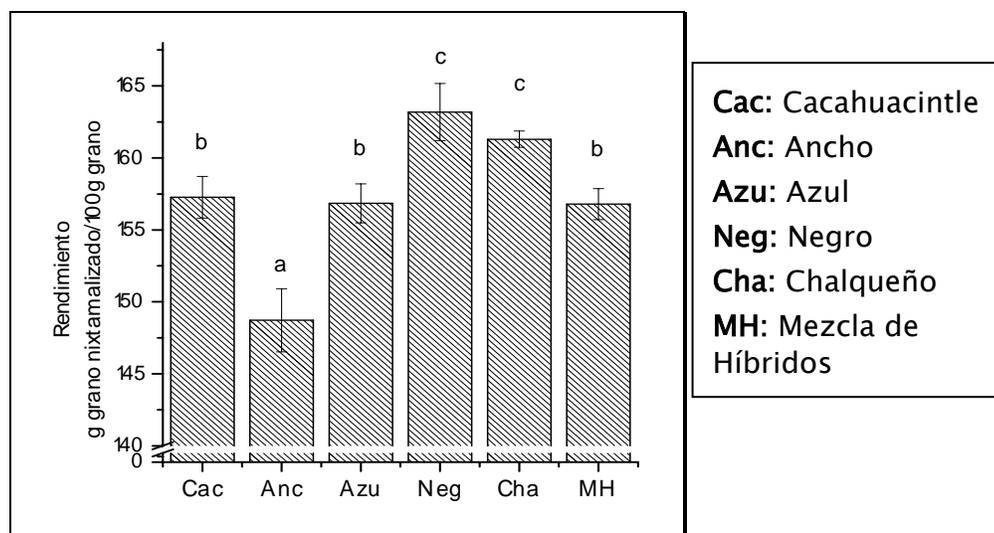
En las harinas, la Mezcla de Híbridos, fue la que mostró el mayor porcentaje de SS_{alc} con 21.6 seguido por Negro y Ancho con 21.2%, después quedó con 20.7% el Chalqueño, en



seguida Azul e Hidalgo con 19.9 y 19.1 % respectivamente y al último el Cacahuacintle con 9.6 % (Tabla 20). Se encontró una correlación significativa ($p > 0.01$) con el PH_{Har} alcalino ($r = 0.911$), lo que indica que el %SS es proporcional al hinchamiento, es decir a mayor ingreso de agua menor es la rigidez y estabilidad del gránulo lo cual concuerda con Cheng-Yi *et al.*, 1996. Los SS_{Alc} fueron mayores a los SS_{Neu} aproximadamente 2 veces más, seguramente, por el efecto discutido antes y se agruparon de manera similar a los obtenidos en harinas a pH neutro ($r = 0.864$, $p > 0.05$). En el incremento de SS también contribuyó la degradación de los componentes de la fibra por parte de la solución alcalina además de la amilopectina y amilosa lixiviada (Trejo-Gonzalez *et al.*, 1982; Pflugfelder *et al.*, 1988).

7. Parámetros de Nixtamalización

Se logró determinar el rendimiento y los sólidos solubles de la nixtamalización así como la humedad final del grano nixtamalizado. Los resultados se pueden observar en las gráficas 6 y 7.



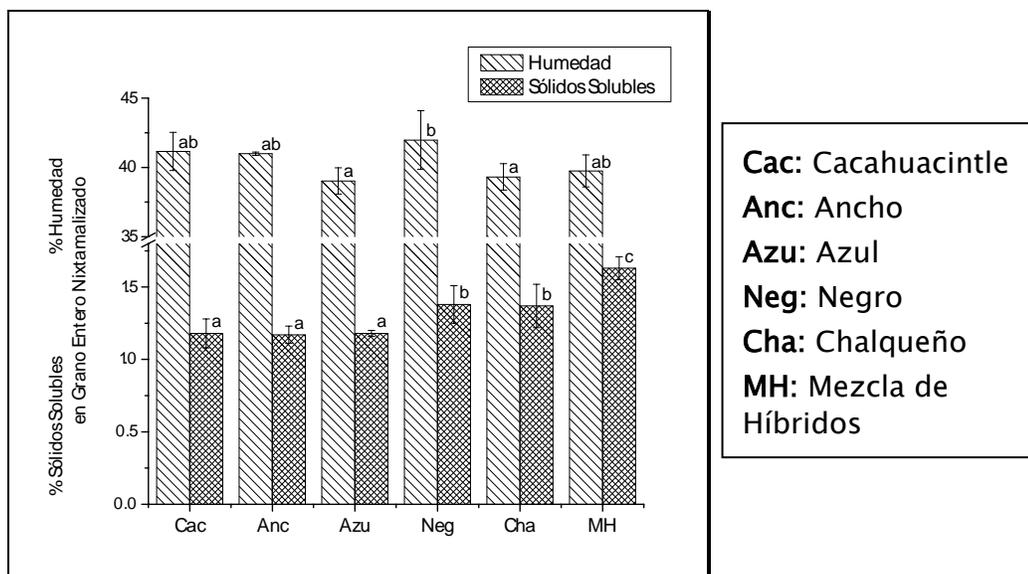
Gráfica 6. Rendimiento de grano nixtamalizado de maíz



En relación al rendimiento del grano nixtamalizado se encontraron 3 subgrupos estadísticos (Duncan, $p > 0.05$). En el primero se ubicaron el maíz Negro y el Chalqueño, seguidos por el Cacahuacintle, Azul y Mezcla de Híbridos; en el último grupo se ubicó el grano del maíz Ancho. La muestra de Hidalgo no fue analizada por que se terminó el grano disponible. Los valores del rendimiento se encontraron dentro de lo esperado. El alto rendimiento del Negro pudo haberse debido a una mayor absorción de agua, ya que el grano de esta variedad alcanzó la mayor humedad (Gráfica 6). La tendencia de los resultados mostró una correlación significativa ($p > 0.05$) con el poder de hinchamiento alcalino de $r = 0.748$ (apéndice 4) lo que sugiere que el comportamiento de los granos en la nixtamalización fue similar al que mostraron los almidones a pH alcalino e indicando que los gránulos del almidón se gelatinizaron e hincharon al menos parcialmente como han indicado algunos autores.

El rendimiento del grano al nixtamalizarse es un parámetro muy importante para los productores en la selección de variedades útiles para la nixtamalización, por lo cual se puede afirmar que las variedades Negro y Chalqueño tienen ventaja en esta característica respecto a las demás variedades. También se desechó la idea de que los criollos tengan rendimientos menores a las variedades híbridas ya que todos excepto el Ancho superaron o igualaron en rendimiento a la Mezcla de Híbridos.

Se observó una tendencia a mostrar un mayor rendimiento en maíces con endospermo intermedio o duro, y menor rendimiento en maíces con endospermo muy suave. Resultados similares han sido reportados por Pflugfelder *et al.*, en 1988. Sin embargo, las muestras con endospermo duro tuvieron mayores niveles de sólidos solubles. Sefa-Dedeh *et al.*, (2004) reportaron contenidos de humedad similares.



Gráfica 7. Humedad y Sólidos Solubles del grano entero nixtamalizado

La humedad en el grano refleja cuánta agua pudieron absorber los granos al nixtamalizarse, lo cual está relacionado con el contenido de almidón de sus las harinas ($r = 0.756$, $p > 0.05$), así cómo con su contenido de proteína ($r = -0.831$, $p > 0.05$); dicha correlación negativa entre la humedad y el contenido de proteína puede deberse a que la proteína está relacionada en parte con el pericarpio que rodea el grano y puede actuar como barrera en la entrada de agua hacia su interior. Debido a la complejidad de organización y composición que hay en los granos es difícil relacionar el comportamiento con el desempeñado por las harinas y/o almidones extraídos, sin embargo, se puede considerar que el mayor efecto en el rendimiento de nixtamalización de los granos está dado por el almidón, debido a que es su componente mayoritario.



CONCLUSIONES

-  Los contenidos de amilosa de las variedades de maíces criollos Azul, Negro, Hidalgo y Ancho fueron similares al de la Mezcla de Híbridos, aunque existen variedades como el Chalqueño con menor y el Cacahuacintle con mayor cantidad de amilosa.

-  En promedio, los maíces criollos estudiados tuvieron mayor contenido de amilosa (y menor de amilopectina) que la Mezcla de Híbridos.

-  El contenido de amilopectina en el almidón no se relacionó con la T_i , T_p , T_f e Intervalo de gelatinización. Posiblemente estos parámetros guardan mayor relación con la estructura y la naturaleza de las interacciones que establece la amilopectina en los almidones.

-  A mayor contenido de amilopectina mayor fue el ΔH de los almidones.

-  Un mayor contenido de amilosa causa una mayor formación de complejos de inclusión con los lípidos y por tanto un mayor ΔH de fusión de estos complejos

-  La amilopectina tiene un efecto positivo en la absorción de agua en condiciones neutras y alcalinas.

-  Los complejos de amilosa-lípidos tienen un efecto negativo en la absorción de agua.

-  La amilosa y la amilopectina del almidón se solubilizan conjuntamente al calentarse en agua.

-  La amilosa favorece la retención de agua en soluciones alcalinas con concentraciones de ~0.1% de Ca(OH)_2 .

-  La amilopectina se vuelve más soluble en condiciones alcalinas.

-  La nixtamalización provoca un aumento en la capacidad de absorción de agua por parte del almidón.

-  Los maíces criollos son muy diversos en su composición y sus propiedades fisicoquímicas, y presentan diferencias respecto a las variedades híbridas.

-  Los almidones de la Mezcla de Híbridos y Ancho tuvieron los mayores Poderes de Hinchamiento por lo que presentan mayores rendimientos y mejores texturas al ser gelatinizados.

CONCLUSIONES RESPECTO A SUS USOS POTENCIALES

-  Los almidones de maíces Cacahuacintle, Ancho e Hidalgo tuvieron el más bajo contenido de amilosa por lo que su velocidad de retrogradación es mayor que la de las demás muestras y por lo tanto pueden usarse para obtener productos dirigidos a personas con obesidad y sobrepeso además de ser útiles en la prevención de enfermedades cardiovasculares y diabetes por que el consumo de almidones retrogradados o resistentes está asociado con la disminución del colesterol y glucosa en sangre.



-
-  Los almidones de la Mezcla de Híbridos y el Chalqueño fueron los primeros en iniciar la gelatinización, por lo tanto son ventajosos para reducir los gastos de energía y las pérdidas de nutrientes y sabor asociadas a las altas temperaturas.

 -  El maíz Chalqueño tiene un amplio intervalo de gelatinización por lo que puede mantener estable su viscosidad en un intervalo mayor de temperaturas y puede ser mejor aplicado para procesos donde se cocine el almidón en etapas consecutivas, como en la elaboración de masa de nixtamal.

 -  Los almidones del Negro e Hidalgo tuvieron los menores ΔH de gelatinización por lo tanto son variedades que pueden ser usadas para reducir el consumo de energía.

 -  El maíz Ancho tuvo los mayores valores de sólidos solubles por lo que es apto para la elaboración de productos como atoles, ya que eso mejora las cualidades sensoriales del producto.

 -  Almidones de maíces como Hidalgo, Chalqueño y Azul, que tienen poca liberación de sólidos solubles y por tanto baja solubilidad de la amilosa, favorecen la formación adecuada de las propiedades del nixtamal y de la tortilla.

PERSPECTIVAS

De la realización de la presente investigación surgieron las siguientes perspectivas y propuestas de trabajo con la finalidad de dar seguimiento y continuidad al estudio realizado:

-  Realizar estudios estadísticamente válidos y representativos para razas y/o grupos de razas de maíz.
-  Llevar acabo una valoración estructural de los almidones de los maíces criollos, usando por ejemplo, cromatografía de exclusión de tamaño de alta resolución.
-  Determinar la cantidad de lípidos totales y por tipo presentes en los gránulos del almidón, así como de los lípidos que formen complejos de inclusión con la amilosa.
-  Averiguar el efecto de la relación amilosa-amilopectina en las propiedades reológicas de almidones y harinas de los criollos.
-  Mejorar la precisión y sensibilidad en la determinación de las propiedades de absorción de agua.
-  Realizar investigaciones acerca de la cristalinidad del almidón (por ejemplo mediante cristalografía de rayos X) y el efecto en ella por parte de las condiciones climáticas.
-  Investigar más a fondo el comportamiento de la amilosa/amilopectina en condiciones de nixtamalización, así como estudiar a más detalle las interacciones de la amilosa/amilopectina con el calcio.
-  Recabar información acerca de los diferentes usos que se les dan a las diferentes variedades y razas de maíces criollos.
-  Estudiar el rol de la amilosa/amilopectina en otros alimentos nixtamalizados, así como en procesos diferentes a la nixtamalización. Por ejemplo las fermentaciones, atoles y tamales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agama-Acevedo M., Ottenhof M. A., Farhat I. A., Paredes-López O, Ortiz-Cereceres J. y Bello-Pérez L. A. *Aislamiento y Caracterización del almidón de maíces pigmentados*. Agrociencia, 2005, 39: 419-429.
2. Aguilar J., Illsey C. y Marielle C. *Capítulo: Los sistemas agrícolas del maíz y sus sistemas técnicos*, pp. 83 - 122. En Sin Maíz no hay País. Consejo Nacional para las Culturas Populares, México, 2003.
3. Arámbula-Villa G., González-Hernández J. y Ordorica-Falomir C. A. *Physicochemical, structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour supplement with various types of corn lipids*. Journal of cereal science, 2001, 33: 245-252.
4. Asp N. G., Van Amelsvoort J. M. y Hautvast J. G. A. J. *Nutritional implications of resistant starch*. Nutr. Res. Rev, 1996, 9: 1-31.
5. Barkin, D. *Capítulo: El maíz y la economía*, pp. 155 - 176. En libro Sin Maíz no hay País. Consejo Nacional para las Culturas Populares, México, 2003.
6. Bartolini R.H. *El maíz*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, (1990) p. 9
7. Belitz, H. D. *Food Chemistry*. 3ª edition, Berlín, 2004.
8. BeMiller B. y Whistler K. *Carbohydrates*, Capítulo 4 en Food Chemistry by Owen R. Fenemma, 3ª edition, New York, 1996.
9. Billeb de Sinibaldi A. C., y R. Bressani, R. *Características de cocción de once variedades de maíz*. Arch. Latinoam. Nutr. 2001, 51: 86-94.
10. Bommer, D. F. R. 1991. *The historical development of international collaboration in plant genetic resources*. In; *Searching for New Concepts for Collaborative Resources Management*. Van Hintun Th. J. L., L. Frese, y P. M. Perrin (eds). Paper of the EUCARPIA/IBPGR Symposium. International Board for plant Genetic Resources. Roma, Italia. Pp: 3-12.
11. Bryant C. M. y Hamaker B. R. *Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch*. Cereal Chemistry. 1997, 74(2): 171-175.
12. Cambell M. R., Pollak L. M. y White P. J. *Effect of planting date on maize starch thermal properties by using differential scanning calorimetry*. Cereal foods World, 1992, 37: 57.

13. Challenger, Antony. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología de la UNAM y Agrupación Sierra Madre, S.C. 1998.
14. Cheng-Yi L., Mei-Lin T. y Kuo-Hsuen T. *Effect of amylase content on the rheological property of rice starch*. Cereal Chemistry, 1996, 73(4): 415-420.
15. Corn Refiners Association Inc. Corn starch. Folleto Técnico. 5th Edition, Washington D.C., 1983. pp 6 - 9.
16. Darrah L.L., McMullen M. D. y Zuber M. S. *Corn perspective and culture* en Corn: Chemistry and Technology. Comp. White J.P., Johnson L.A., 2nd Edition. AACCC, St., Paul Minnesota, 2003. USA. Pp 35-68
17. Donzhanky, T. *Genetics and the Origin of Species*. Columbia University Press. Series: The Columbia Classics in Evolution. New York. 1982. p 364 p.
18. Eliasson Ann-Charlotte. *Interactions between starch and lipids studied by DSC*. Thermochemica Acta, 1994, 246: 343-356.
19. Farnham D.E. *Corn perspective and culture* en Corn: Chemistry and Technology. Comp. White J.P., Johnson L.A., 2nd Edition. AACCC, St., Paul Minnesota, 2003 USA. Pp 1-2
20. Gallant D. J., Bouchet B. y Baldwin P. M. *Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization*. Carbohydrate polymers, 1997, 32: 171-191.
21. Gibson T. S., Solah V. A. y McCleary B. V. *A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with Concanavalin A*. Journal of cereal science, 1997, 25: 111-119.
22. Gómez M. H., Lee J. K., McDonough C. M., Waniska R. D. y Rooney L. W. *Corn starch changes during tortilla and tortilla chips processing*. Cereal Chemistry, 1992, 69(3): 275-279.
23. Hahn, D. E. y Hood, L. F. *Factor influencing corn starch-lipid complexing*. Cereal chemistry, 1987, 64: 81-85.
24. Hernández X., E. *Exploración etnobotánica en maíz*. Fitotecnia Latinoamericana, 1972, 8: 46-51.

25. Hernández X. E. *Biología Agrícola: los conocimientos biológicos y su aplicación a la agricultura*. México: Consejo Nacional para la Enseñanza de la Biología, CECSA, 1985.
26. Herrera C. B. E. *Diversidad del maíz Chalqueño*. *Agrociencia*, 2004, 38: 191-206.
27. Hoover R., Smith C., Zhou Y. y Ratnayake R. M. W. S. *Physicochemical properties of Canadian oat starches*. *Carbohydrate Polymers*, 2003. 52, 253-261.
28. Hoover, R. *Composition, molecular structure, and physicochemical structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review*. *Carbohydrate Polymers*, 2001, 45: 253-267.
29. Hosney R. C. *Principios de ciencia y tecnología de los cereales*. Editorial Acribia, Zaragoza, España, 1991. Pp 31-55.
30. Jackson D. S., Choto-Owen C., Waniska R. D. y Rooney L. W. *Characterization of starch cooked in alkali by aqueous High-performance size-exclusion chromatography*. *Cereal Chemistry*, 1988, 65(6): 493-496.
31. Jane J., Chen Y. Y., Lee L. F., McPherson A. E., Wong K. S., Radosavljevic M. y Kasemsuwan T. *Effects of amylopectin branch and pasting properties of starch*. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(5): 629-637.
32. Ji Y., Seetharaman K., Wong K., Pollak L. M., Duvick S., Jane J. y White P. J. *Thermal and structural properties of unusual starches from developmental corn lines*. *Carbohydrate polymers*, 2003, 51: 439-450.
33. Karkalas, J. y Raphaelides S. *Thermal dissociation of amylose-fatty acid complexes*. *Carbohydrate research*, 1988, 172: 65-82.
34. Katz S. H., Heddiger M. L. y Valleroy L. A. *Traditional maize processing techniques in the new world*. *Science*, 1974, 184: 765-773.
35. Kawaljit Singh Sandhu, Narpinder Singh y Maninder Kaur. *Characteristics of the different corn types and their grain fraction: physicochemical, thermal, morphological and rheological properties of starches*. *Journal of food engineering*, 2004, 64: 119-127.
36. Kit amylose/amylopectin. Manual Megazyme, Folleto técnico. Megazyme Inc. Ireland. 2005

37. Krueger B. R., Knutson, C. A., Inglett, G.E. y Walker, C.E. *A differential scanning calorimetry study on effect of annealing on gelatinization behavior of corn starch*. J. Food Sci., 1987, 52: 175.
38. Leach, W., McCowen, D. y Schoch. T. J. *Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches*. Cereal Chemistry, 1959, 36: 534.
39. Li, J., Berke, T. G. y Glover, D. V. *Variation for thermal properties of starch in tropical maize germplasm*. Journal of Cereal Science, 1994, 71(1), 87-90.
40. Li, J. y Yeh, A. *Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches*. Journal of food engineering, 2001, 50:141-148.
41. Linfeng W. y Paul A. S. *Australian salt-noodle flours and their starches compared to U.S. wheat flours and their starches*. Cereal chemistry, 1996, 73(2): 167-175.
42. Llanos, C. M. *El maíz, su cultivo y aprovechamiento*. Mundi-Prensa, Madrid, España, 1984, pp 252-253.
43. Méndez-Montealvo G., Solorza-Feria J., Velázquez del Valle M., Gómez-Montiel N., Paredes-López O. y Bello-Pérez L. A. *Composición química y caracterización calorimétrica de híbridos y variedades de maíz cultivadas en México*. Agrociencia, 2001, 39: 267-274.
44. Mendez-Montealvo G., Sanchez-Rivera M. M., Paredes-Lopez O. y Bello-Perez L. A. *Thermal and Rheological properties of nixtamalized maize starch*. International Journal of Biological Macromolecules, 2006, 40(1): 59-63.
45. Mondragon M., Bello-Pérez L. A., Agama E., Melo A., Betancur-Ancona D. y Peña J. L. *Effect of nixtamalization on the modification of the crystalline structure of maize starch*. Carbohydrate Polymers, 2004, 55: 411-418.
46. Morrison, W. R. y Laignelet, B. *An improved colorimetric procedure for determining apparent and total amylase in cereal and other starches*. Journal of Cereal Science, 1983, 1: 9-20.
47. NMX-FF-034/1-2002 *PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS PARA CONSUMO HUMANO – CEREALES – PARTE I: MAÍZ BLANCO PARA PROCESO ALCALINO PARA TORTILLAS DE MAÍZ Y PRODUCTOS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO- ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA*, SECOFI.

48. Official Methods of analysis by AACC, American Association of Cereal Chemistry, ST. Paul, Minnesota, USA, 1983.
49. Official Methods of analysis by AOAC International, 16th edition; by AOAC International, 2000.
50. Ortega Paczka, Rafael J. J. Sánchez G., F. Castillo Gonzales y J.M. Hernández Casillas. 1991. *Estado actual de los estudios sobre maíces nativos de México*, en: Ortega P., R., G. Palomino H., F. Castillo G., V.A. Gonzales H. y M. Livera M. (eds.), Avances en el estudio de los recursos filogenéticos de México. México: Sociedad Mexicana de Filogenéticos de México. México: Sociedad Mexicana de Citogenética. Pp. 170-173
51. Ortega Paczka, Rafael. *Capítulo: La diversidad del Maíz en México*, pp. 123 - 153. En libro Sin Maíz no hay País. Consejo Nacional para las Culturas Populares, México, 2003.
52. Perez O. E., Haros M., Suarez C. y Rosell C. M. *Effect of steeping time on the starch properties from ground whole corn*. Journal of food engineering, 2003, 60, 281-287.
53. Pflugfelder R. L., Rooney L. W. y Waniska R. D. *Dry matter Losses in Commercial Corn Masa Production*. Cereal Chemistry, 1988, 65(2): 127-132.
54. Pflugfelder R. L., Rooney L. W. y Waniska R. D. *Fractionation and composition of commercial corn masa*. Cereal Chemistry, 1988, 65(3): 262-263.
55. Pratt R. C., Paulis J. W., Miller K., Nelsen T. y Bietz J. A. *Association of Zein Classes with Maize Kernel Hardness*. Cereal chemistry, 1995, 72(2):162-167.
56. Qi X., Tester R. F., Snape C. E., Yuryev V., Wasserman L. A., y Ansell R. *Molecular basis of the gelatinization and swelling characteristics of waxy barley starches grown in the same location during the same season. Part II. Crystallinity and gelatinization characteristics*. Journal of Cereal Science, 2004, 39: 57-66.
57. Rangel-Meza E., Muñoz-Orozco A., Vázquez-Carrillo G., Cuevas-Sánchez J., Merino-Castillo J. y Miranda-Colín S. Nixtamalización, elaboración y calidad de tortilla de maíces de Ecatlán, Puebla, México. Agrociencia 2004, 38: 53-61.
58. Reyes C. P. *El maíz y su cultivo*. AGT editor S.A., México, 1990.



59. Robutti J., Borrás F, González R., Torres R. y De Greef D. *Endosperm properties and extrusion cooking behavior of maize cultivars*. Journal of Cereal Science, 2002, 35:663-669.
60. Rodríguez M. E., Yañez-Limón M., Alvarado-Gil Y. Y., Vargas H., Sánchez-Sinencio F., Figueroa J. D. C., Martínez-Bustos F., Martínez-Montes J. L., González-Hernández J. y Miranda L. C. M. *Influence of the structural changes during alkaline cooking on the thermal, rheological, and dielectric properties of corn tortillas*. Cereal Chemistry, 1996, 73(5): 593-600.
61. Sánchez G. y Chuela M. *Monitoreo y recolección del Teosintle en México*. Informe de Investigación no publicado. Campo Experimental Centro de Jalisco, 1995, CIPAC, INIFAP.
62. Sánchez G., J., Goodman M.M. y Stuber C.W. *Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico*. Economy Botany, 2000, 54(1): 45-47.
63. Sandhu K. S., Singh, N. y Malhi, S. N. *Physicochemical and thermal properties of starches separated from corn produced from crosses of two germ pools*. Food Chemistry, 2005, 89: 541-548.
64. Sasaki T., Yasui T. y Matsuki J. *Effect of amylose content on gelatinization, retrogradation, and pasting properties of starches from waxy and nonwaxy wheat and their F1 seeds*. Cereal Chemistry, 1999, 77(1): 58-63.
65. Sefa-Dedeh S. Cornelius B. Sakyi-Dawson E. y Ohene-Afoakwa E. *Effect of nixtamalización on the chemical and functional properties of maize*. Food Chemistry, 2004, 86: 317-324.
66. Serna-Saldivar S. O., Gómez R. H. y Rooney L. W. *Technology, Chemistry and nutritional value of alkaline cooked corn products*. Page 243 en: Advances in Cereal Science and Technology. Vol X, Pomeranz Y. Ed. AACC San Paul Minnesota, 1991.
67. Singh N., Singh J., Kaur L., Singh S. N. y Singh G. B. *Review: Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources*. Food Chemistry, 2003, 81: 219-231.
68. Soulaka A. B. y Morrison W. *The amylose and lipid contents, dimensions, and gelatinization characteristics of some wheat, starches and their A- and B-granule fractions*. Journal of Science and food agriculture, 1985, 36: 709-718.

69. Srichuwong S., Sunarti T. C., Mishima T., Isono N. y Hisamatsu M. *Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility*. Carbohydrate polymers, 2005.
70. Svegmarm K. y Hermansson A. M. *Microstructure and rheological properties of composites of potato starch granules and amylase: A comparison of observed and predicted structure*. Food Estructure, 1993, 12: 181-193.
71. Tester R. F. y Morrison W. R. *Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose and lipids*. Cereal chemistry, 1990, 67(6): 551-557.
72. Tester R. F., Morrison W. R. y Schuiman A. R. *Swelling and Gelatinization of Cereal starches. V. Risomutants of Bomi & Carlsberg II. Barley cultivars*. Journal of Cereal Science, 1993, 17: 1-9.
73. Tester R. F., Morrison W. R., Gidley M. J., Kirkland M. y Karkalas J. *Properties of damaged Starch granules. III. Microscopy and particle size analysis of undamaged granules and remnants*. Journal of cereal science, 1994, 20: 59-67.
74. Tester R. F. y Karkalas J. *Swelling and gelatinization of Oat starches*. Cereal Chemistry, 1996, 73(2): 271-277.
75. Tester R. F. Karkalas J. y Qi X. *Starch-composition, fine structure and architecture: a review*. Journal of Cereal Science, 2004, 39: 151-165.
76. Toro-Vazquez J. F. y Gómez-Aldapa C. A. *Chemical and Physicochemical properties of maize starch after industrial nixtamalization*. Cereal Chemistry, 2001, 78(5): 543-550.
77. Trejo-Gonzalez A., Morales A. y Wild-Altamirano C. The role of lime in the alkaline treatment of corn tortilla preparation. Page 145 in: Modification of Proteins: Food, Nutritional and Pharmacological Aspects. Advances in Chemistry Series 198. R. E. Feeney and J. R. Whitaker, eds. Am. Chem. Soc.: Washington, DC.
78. Tziotis A., Seetharaman K., Klucinec J. D., Keeling P., White P. L. *Functional Properties of starch from normal and mutant corn genotypes*. Carbohydrate polymers, 2005, 61: 238-247.

79. Valladolid J. R., *Capítulo: Mama Sara*. p. 70. Sin maíz no hay País, 2003 Consejo Nacional para las Culturas Populares, México.
80. Watson A., Ramstad E. Corn: Chemistry and Technology. Am. Association Cereal Chemistry, ST. Paul, Minnesota, USA, pp. 605.
81. Wellhausen E., Roberts M., y Hernández E. *Razas de maíz en México*. Folleto técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. México, 1951.
82. White P. J., Abbas I. R., Pollak L. M. y Johnson L. A. *Intra- and interpopulation variability of thermal properties of maize starch*. Cereal Chemistry, 1990, 67(1): 70-73.
83. White P. J., Pollak L. M. y Burkhart S. *Thermal properties of starches from grown in temperate and tropical environments*. Cereal foods world, 1991, 36: 524.

Referencias electrónicas generales:

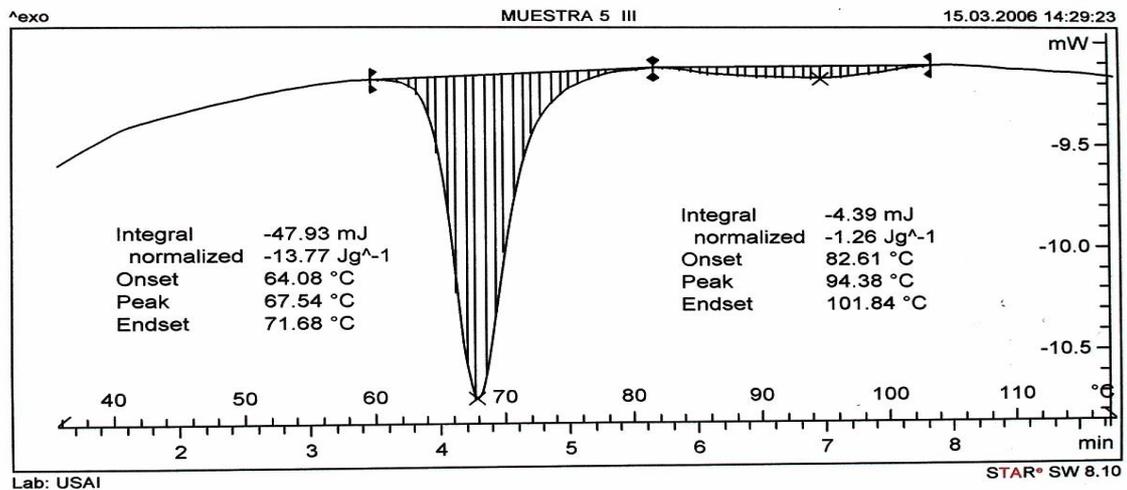
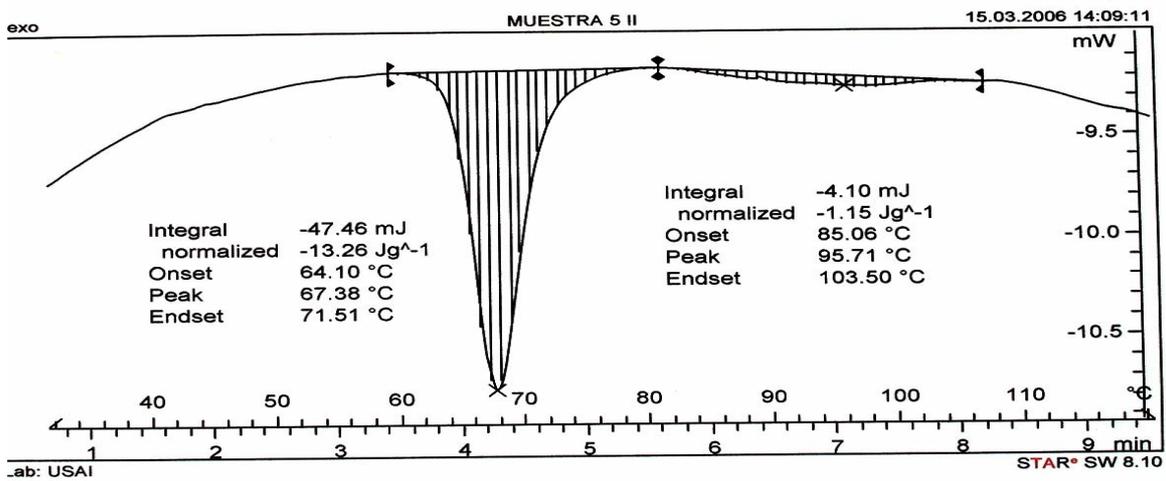
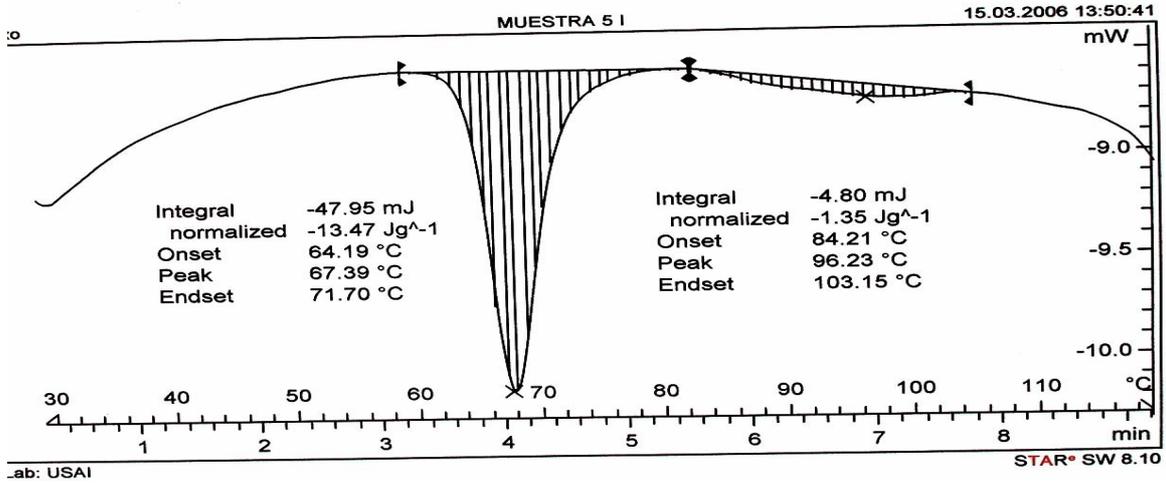
www.fao.org

www.iowacorn.org

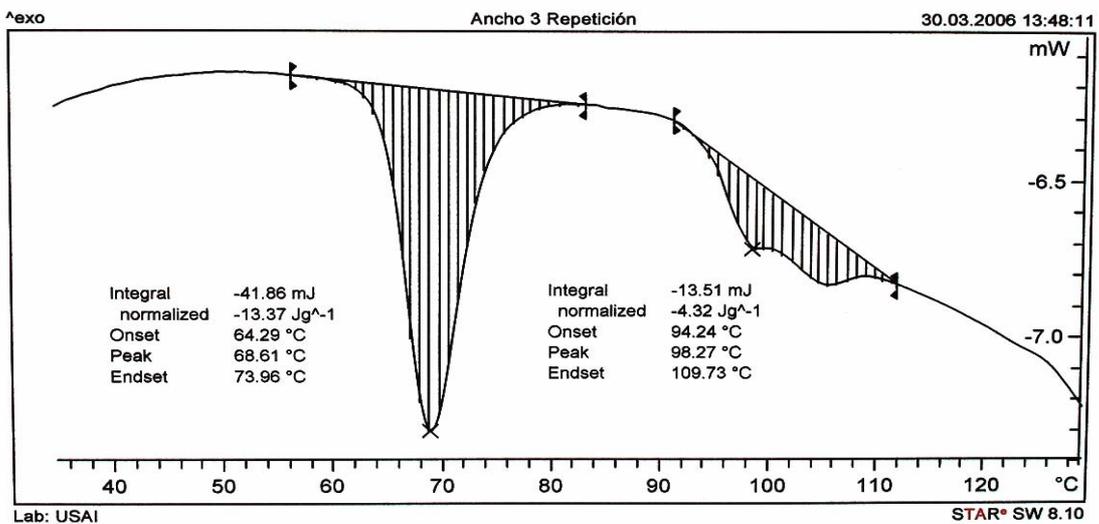
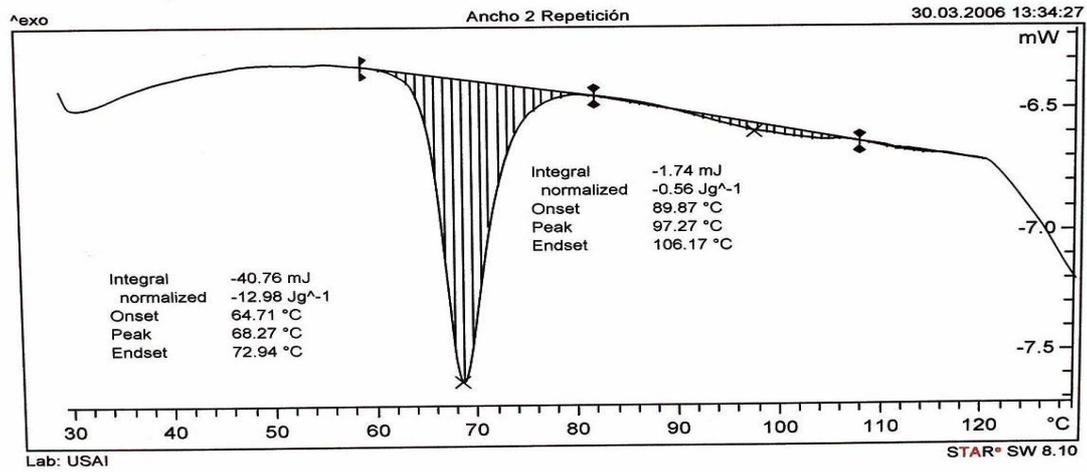
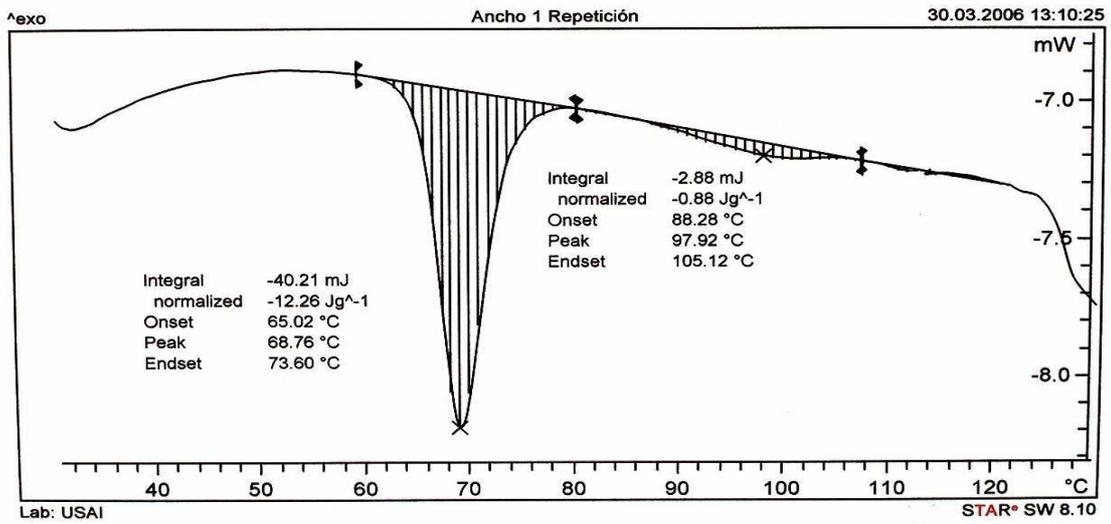
APÉNDICE 1

Termogramas de las variedades estudiadas de maíces

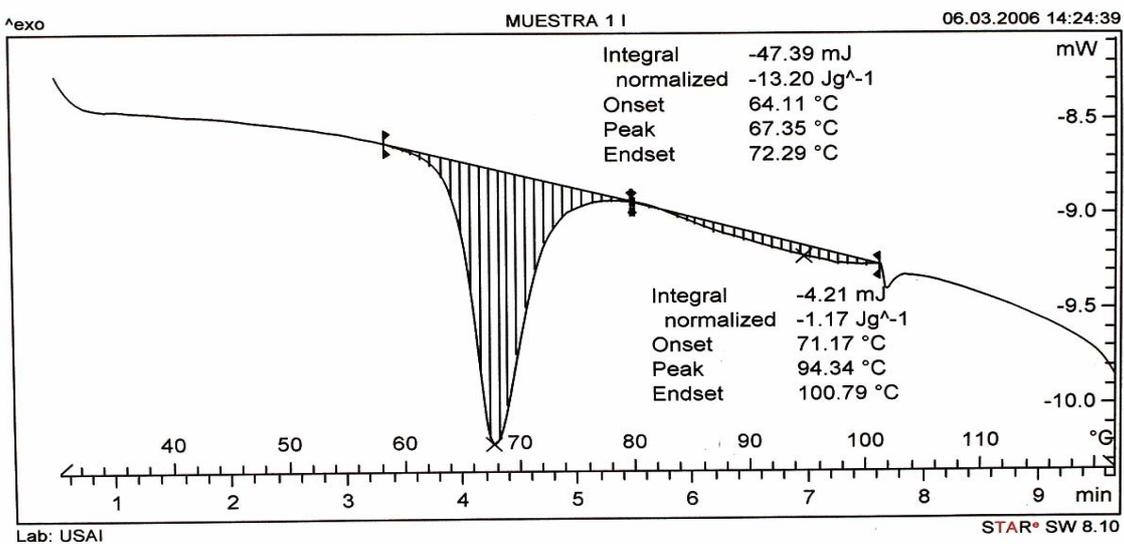
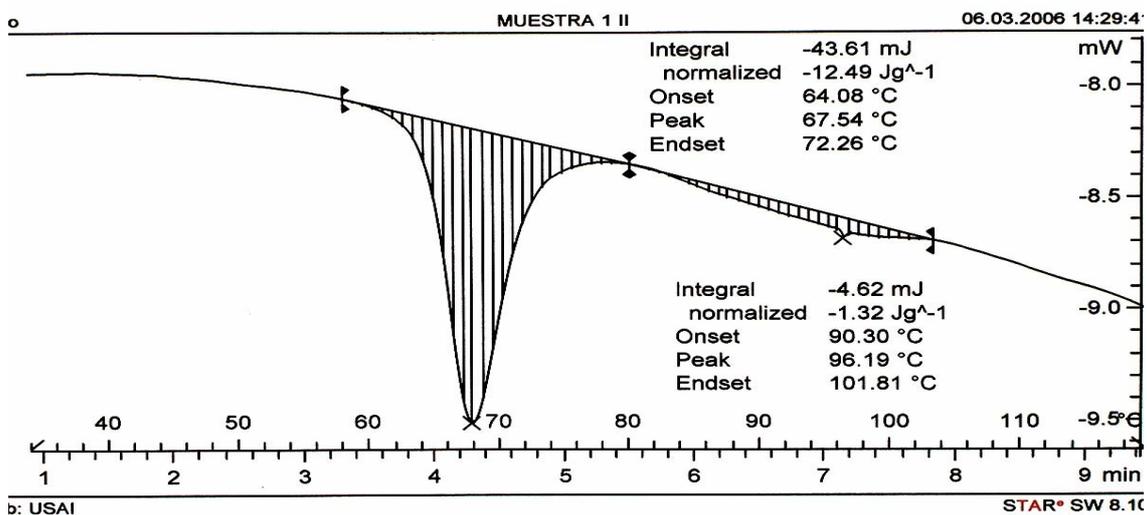
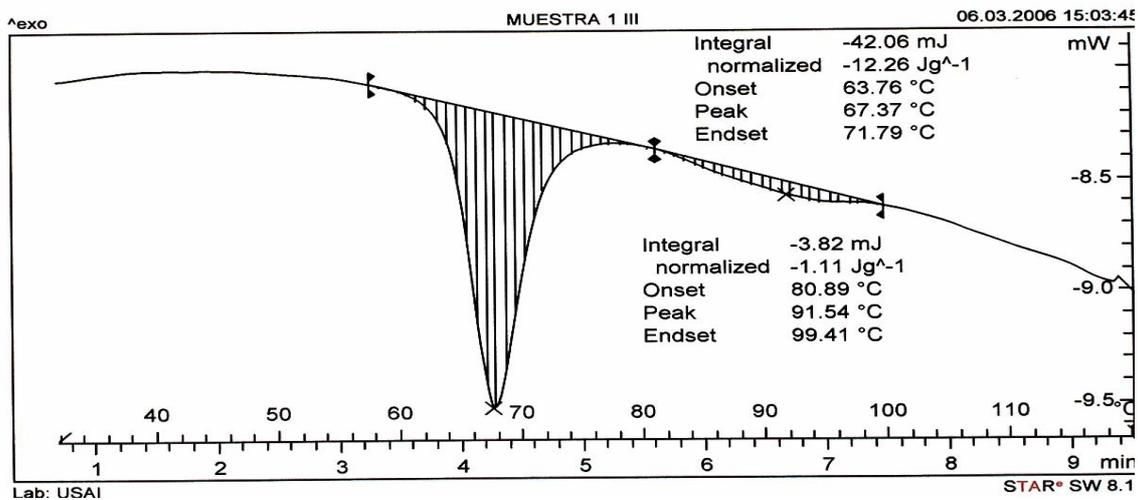
Cacahuacintle



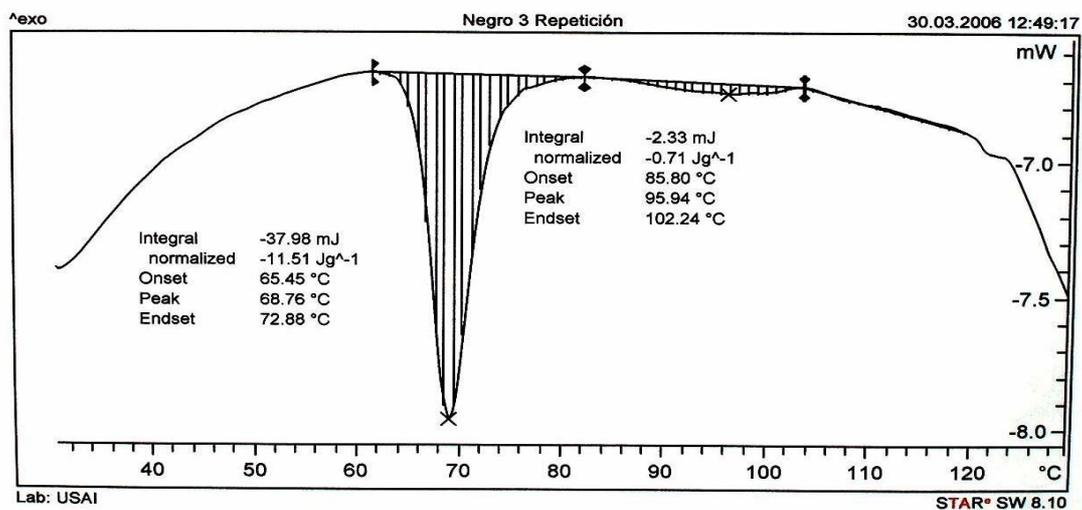
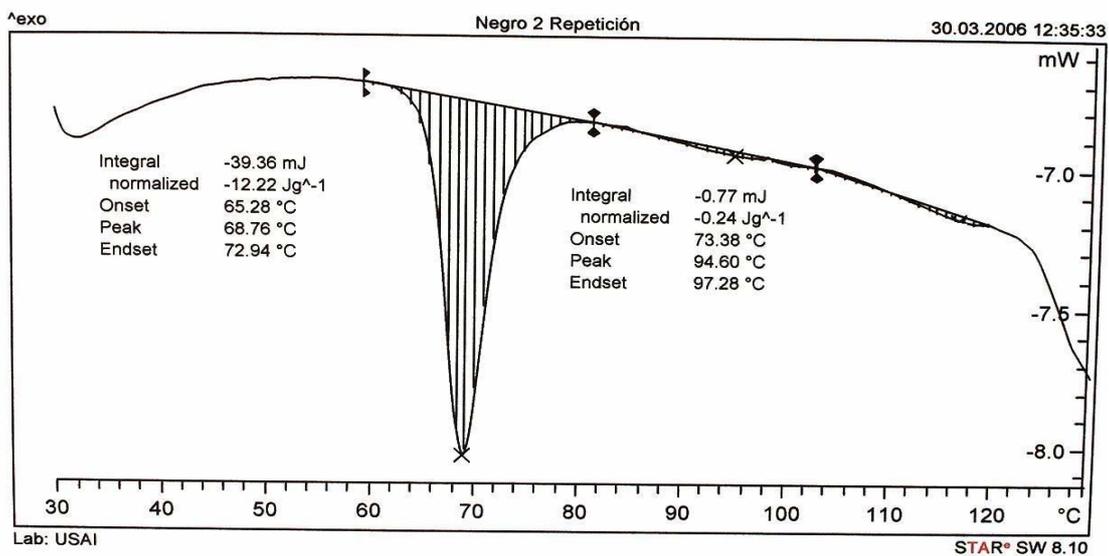
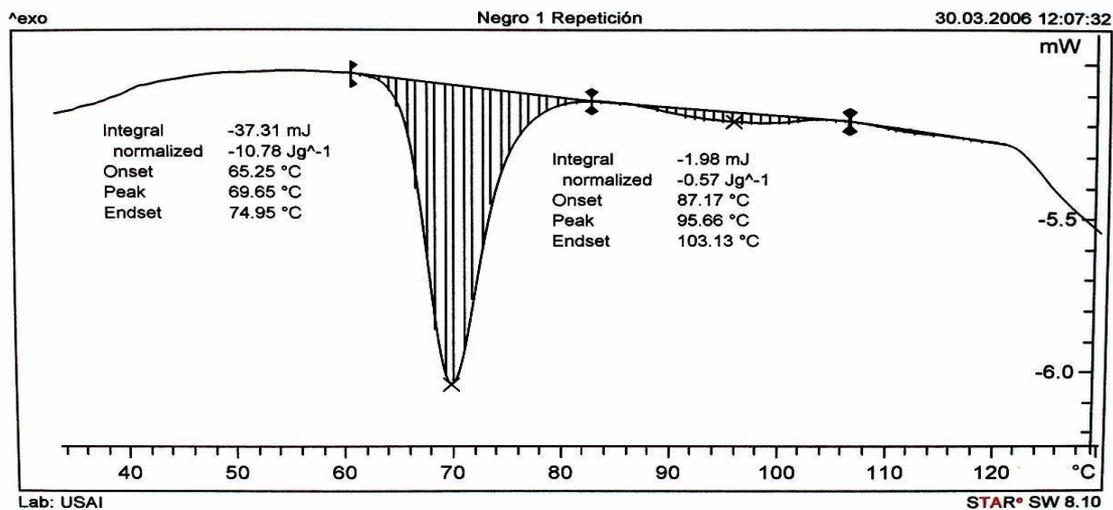
Ancho



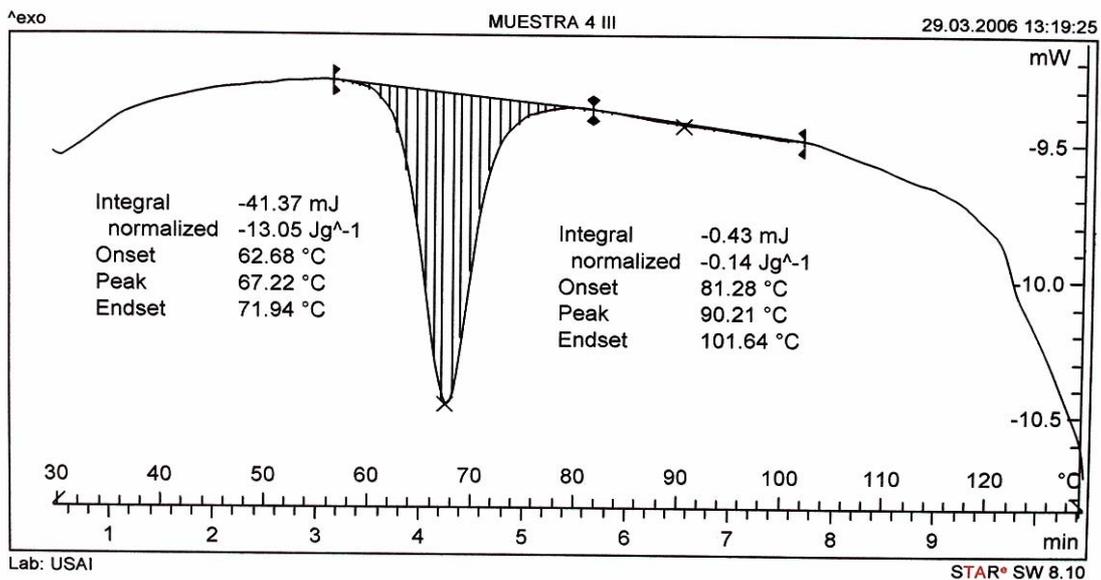
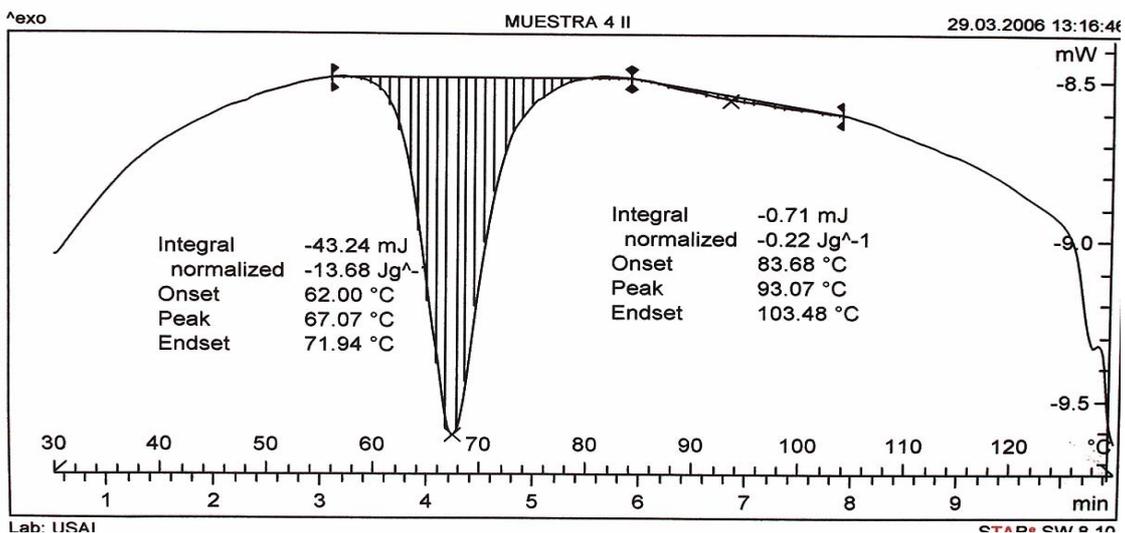
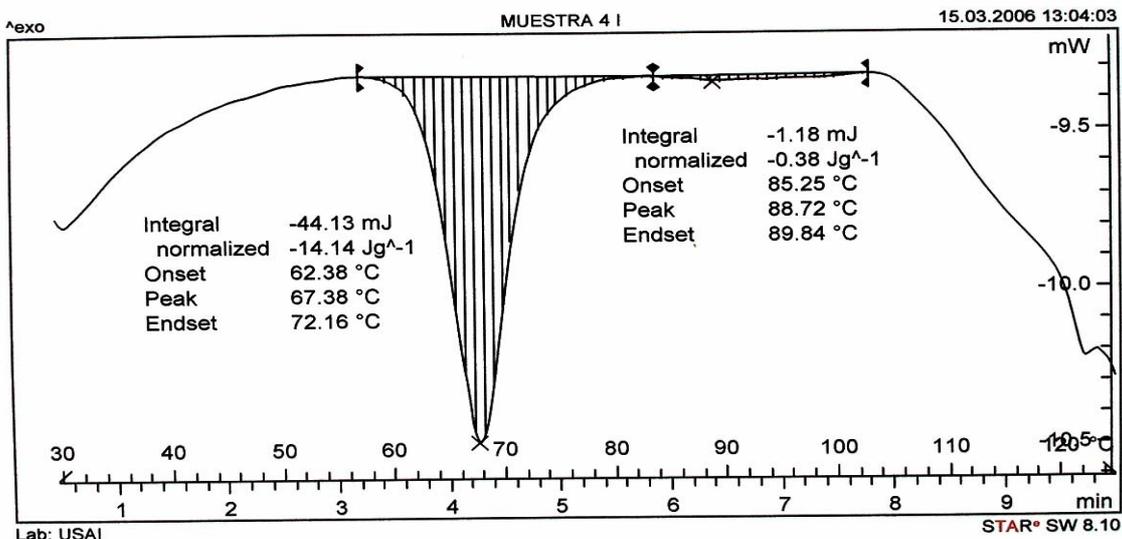
Azul



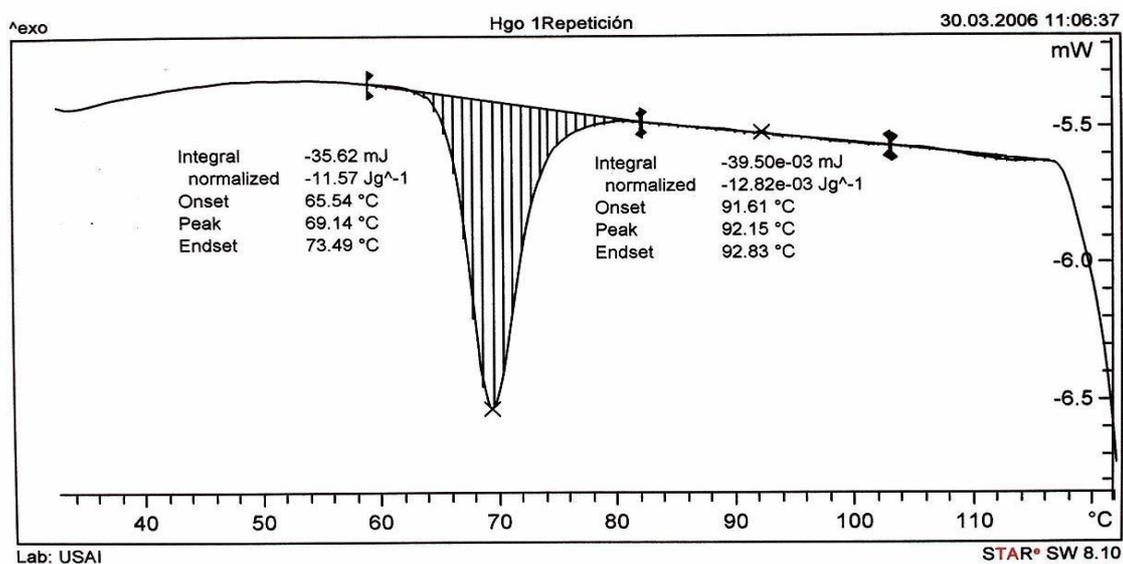
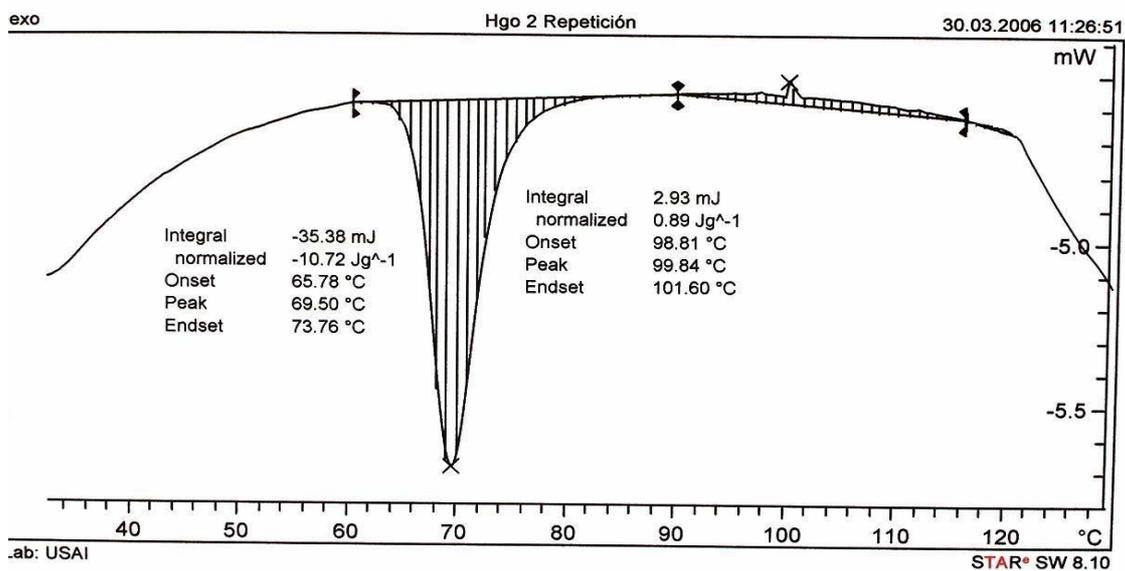
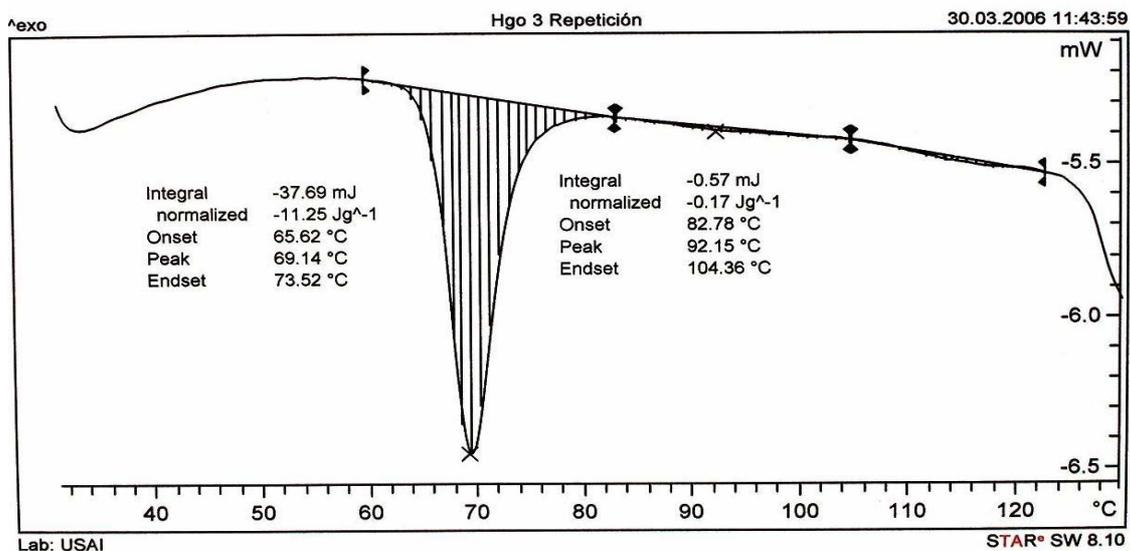
Negro



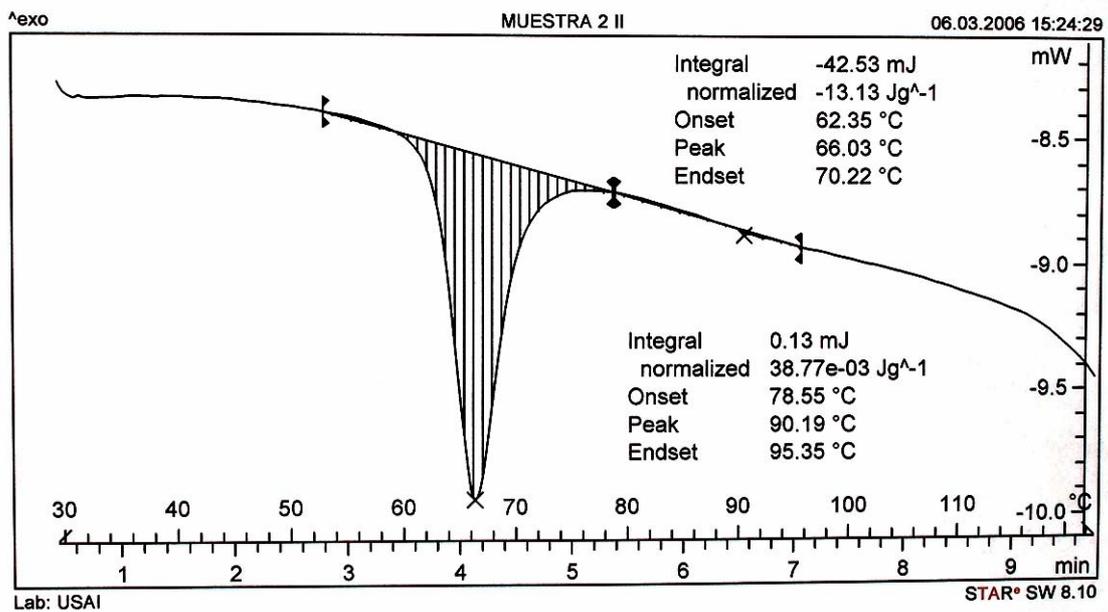
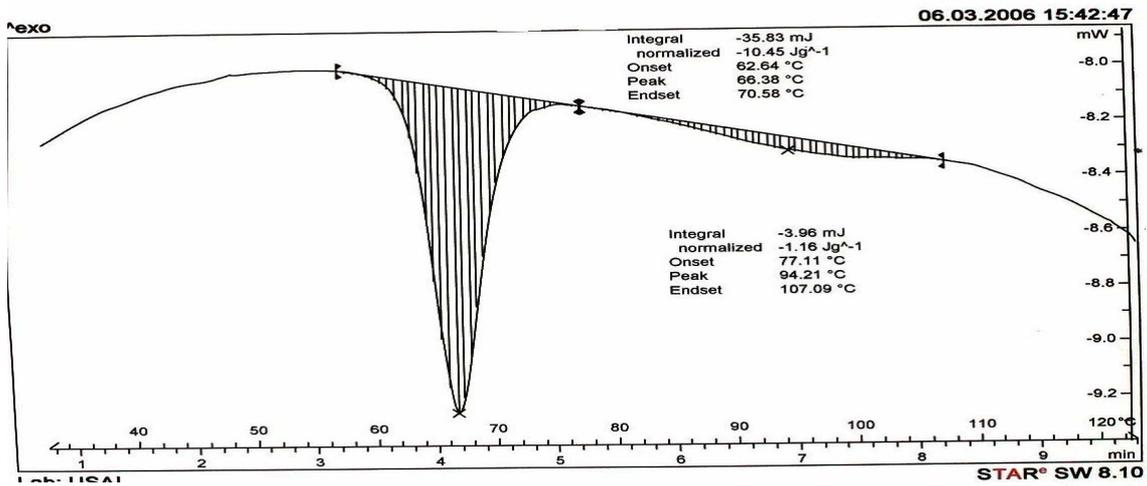
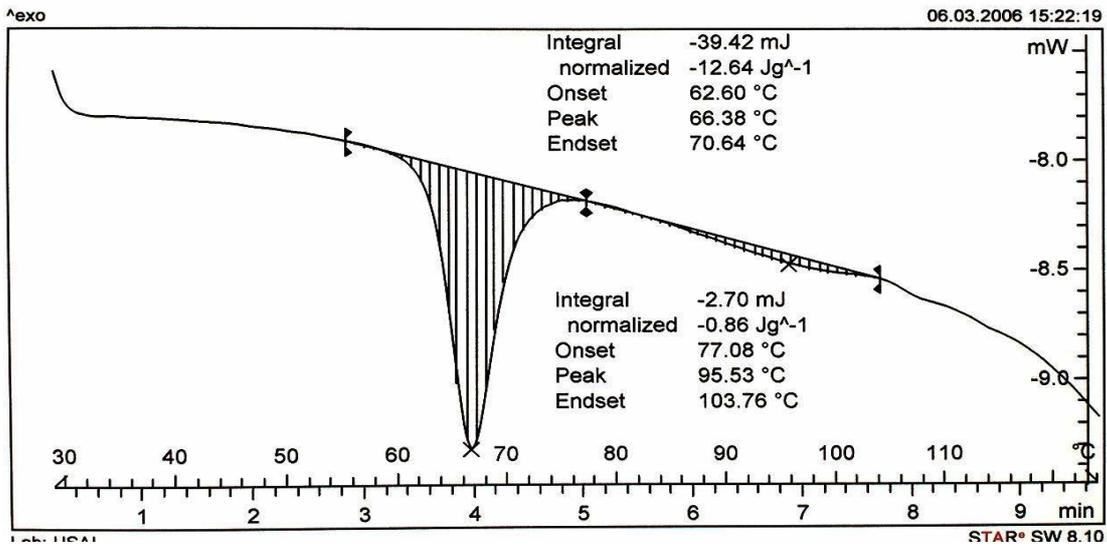
Chalqueño



Hidalgo



Mezcla de Híbridos



APÉNDICE 2

Correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas de los Almidones

	<i>Amilosa</i>	<i>Amilopectina</i>	<i>T_i</i>	<i>T_p</i>	<i>T_f</i>	<i>Int</i>	ΔH	ΔH_{AMP}	<i>ITP</i>	<i>T_{iCOM}</i>	ΔH_{COM}	<i>PH_{NEU} almidón</i>	<i>PH_{ALC} almidón</i>	<i>SS_{NEU} almidón</i>	<i>SS_{ALC} almidón</i>
<i>Amilosa</i>															
<i>Amilopectina</i>	-1.000(**)														
<i>T_i</i>	0.637	-0.636													
<i>T_p</i>			.922(**)												
<i>T_f</i>			.821(*)	.935(**)											
<i>Int</i>	-0.791(*)	.787(*)	-0.507												
ΔH			-0.763(*)	-0.743(*)	-0.584										
ΔH_{AMP}	-0.551	0.546	-0.853(**)	-0.723(*)	-0.543	.693(*)	.948(**)								
<i>ITP</i>	0.631	-0.634			-0.510	-0.658									
<i>T_{iCOM}</i>			0.634	.726(*)	.864(**)										
ΔH_{COM}	0.638	-0.637				-0.539			.732(*)						
<i>PH_{NEU} almidón</i>	-0.216	0.220													
<i>PH_{ALC} almidón</i>									0.514	-0.525		-0.726(*)			
<i>SS_{NEU} almidón</i>												.904(**)	-0.591		
<i>SS_{ALC} almidón</i>										0.547		0.544	-0.659	.670(*)	
<i>PH_{NEU} almidón amp</i>												.978(**)	-0.731(*)	.944(**)	0.620
<i>PH_{ALC} almidón amp</i>	.720(*)	-0.722(*)	0.568						0.580						

* La correlación es significativa a $p > 0.05$ (1 cola) ** La correlación es significativa a $p > 0.01$ (1 cola).

Amilosa: Contenido amilosa almidón, **Amilopectina:** Contenido amilopectina almidón, **T_i:** Temperatura inicial gelatinización, **T_p:** Temperatura pico gelatinización, **T_f:** Temperatura finalización gelatinización, **Int:** Intervalo de temperaturas de Gelatinización, **ΔH :** Entalpía de gelatinización, **ΔH_{AMP} :** Entalpía de gelatinización recalculado en base a la amilopectina, **ITP:** Índice de tamaño de pico, **T_{iCOM}:** Temperatura de inicio de fusión de complejos amilosa-lípido, **ΔH_{COM} :** Entalpía de fusión de complejos amilosa-lípido, **PH_{NEU} almidón:** Poder de hinchamiento almidón a pH neutro, **PH_{ALC} almidón:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino, **SS_{NEU} almidón:** Sólidos solubles de almidón a pH neutro, **SS_{ALC} almidón:** Sólidos solubles de almidón a pH alcalino, **PH_{NEU} almidón amp:** Poder de hinchamiento de almidón pH neutro recalculado en base amilopectina, **PH_{ALC} almidón amp:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino recalculado en base amilopectina.

APÉNDICE 3

Correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas de las Harinas

	<i>Ami</i>	<i>Amp</i>	<i>PH_{NEU} H</i>	<i>PH_{ALC} H</i>	<i>SS_{NEU} H</i>	<i>SS_{ALC} H</i>	<i>PH_{NEU} H amp</i>	<i>PH_{ALC} H amp</i>	<i>PH_{NEU} Alm</i>	<i>PH_{ALC} Alm</i>	<i>SS_{NEU} Alm</i>	<i>SS_{ALC} Alm</i>	<i>PH_{NEU} Alm amp</i>	<i>PH_{ALC} Alm amp</i>	<i>Almidón H</i>	<i>Proteína H</i>
<i>Ami</i>																
<i>Amp</i>	0.581															
<i>PH_{NEU} H</i>																
<i>PH_{ALC} H</i>			.979(**)													
<i>SS_{NEU} H</i>			.915(**)	.848(**)												
<i>SS_{ALC} H</i>	-0.533		.871(**)	.911(**)	.864(**)											
<i>PH_{NEU} H amp</i>	-0.607		.886(**)	.886(**)	.911(**)	.941(**)										
<i>PH_{ALC} H amp</i>			.930(**)	.962(**)	.874(**)	.976(**)	.959(**)									
<i>PH_{NEU} Alm</i>			0.559		.782(*)		0.610									
<i>PH_{ALC} Alm</i>			-0.555		-0.579		-0.593									
<i>SS_{NEU} Alm</i>					0.635											
<i>SS_{ALC} Alm</i>			0.539		0.502											
<i>PH_{NEU} Alm amp</i>			0.507		.717(*)											
<i>PH_{ALC} Alm amp</i>	.815(*)	0.642					-0.533									
<i>Almidón H</i>	.899(**)	.878(**)													.823(*)	
<i>Proteína H</i>	-0.502															
<i>Ceniza H</i>																

* La correlación es significativa a $p > 0.05$ (1 cola) **La Correlación es significativa a $p > 0.01$ (1 cola)

Ami: Contenido amilosa en harina, **Amp:** Contenido amilopectina en harina, **PH_{NEU} H:** Poder de hinchamiento en harina a pH neutro, **PH_{ALC} H:** Poder de hinchamiento en harina a pH alcalino, **SS_{NEU} H:** Sólidos solubles en harina a pH neutro, **SS_{ALC} H:** Sólidos solubles en harina a pH alcalino, **PH_{NEU} H amp:** Poder de hinchamiento en harina a pH neutro recalculado en base amilopectina, **PH_{ALC} Alm amp:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino recalculado en base amilopectina, **PH_{NEU} alm:** Poder de hinchamiento almidón a pH neutro, **PH_{ALC} alm:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino, **SS_{NEU} alm:** Sólidos solubles de almidón a pH neutro, **SS_{ALC} alm:** Sólidos solubles de almidón a pH alcalino, **PH_{NEU} alm amp:** Poder de hinchamiento de almidón a pH neutro recalculado en base amilopectina, **PH_{ALC} alm amp:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino recalculado en base amilopectina, **Almidón H:** Contenido de almidón en harina, **Proteína H:** Contenido de proteína en harina, **Lípido H:** Contenido de lípido en harina.

APÉNDICE 4

Correlaciones de Pearson entre las variables estudiadas de los Granos

	Amilosa	Amilopectina	Ti	Tp	Tf	Int	ΔH_{AMP}	Ti _{COM}	PH _{NEU} Alm	PH _{ALC} Alm	SS _{NEU} Alm	SS _{ALC} Alm	PH _{NEU} Alm amp	PH _{ALC} Alm amp	Rendimiento
Rendimiento	-0.371	0.370						-.748(*)		.748(*)		-0.644			
Humedad	0.600	-0.602	.761(*)	0.728		-0.502	-0.573				0.548	0.628		.763(*)	
SSolubles	-0.441	0.446	-0.555		-0.649			-0.680	0.628				0.547	-0.668	0.584

	Ami	Amp	PH _{NEU} H	PH _{ALC} H	SS _{NEU} H	SS _{ALC} H	Almidón H	Proteína H	Lípido H	Rendimiento
Rendimiento										
Humedad	0.677	.754(*)					.756(*)	-.831(*)	0.567	
SSolubles					0.563					0.584

* La correlación es significativa a $p > 0.05$ (1 cola) ** La Correlación es significativa a $p > 0.01$ (1 cola)

Amilosa: Contenido amilosa almidón, **Amilopectina:** Contenido amilopectina almidón, **Ti:** Temperatura inicial gelatinización, **Tp:** Temperatura pico gelatinización, **Tf:** Temperatura finalización gelatinización, **Int:** Intervalo de temperaturas de Gelatinización, **ΔH_{AMP} :** Entalpía de gelatinización recalculado en base a la amilopectina, **Ti_{COM}:** Temperatura de inicio de fusión de complejos amilosa-lípido, **PH_{NEU} alm:** Poder de hinchamiento almidón a pH neutro, **PH_{ALC} alm:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino, **SS_{NEU} alm:** Sólidos solubles de almidón a pH neutro, **SS_{ALC} alm:** Sólidos solubles de almidón a pH alcalino, **PH_{NEU} alm amp:** Poder de hinchamiento de almidón pH neutro recalculado en base amilopectina, **PH_{ALC} alm amp:** Poder de hinchamiento de almidón a pH alcalino recalculado en base amilopectina, **Rendimiento:** Rendimiento del grano entero nixtamalizado, **Ami:** Contenido amilosa en harina, **Amp:** Contenido amilopectina en harina, **PH_{NEU} H:** Poder de hinchamiento en harina a pH neutro, **PH_{ALC} H:** Poder de Hinchamiento en harina a pH alcalino, **SS_{NEU} H:** Sólidos solubles en harina a pH neutro, **SS_{ALC} H:** Sólidos solubles en harina a pH alcalino, **Almidón H:** Contenido de almidón en harina, **Proteína H:** Contenido de proteína en harina, **Lípido H:** Contenido de lípido en harina.