



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA

DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y GENÉTICA DE MAÍZ
CACAHUACINTLE EN UNA REGION DE LOS VALLES
ALTOS DE PUEBLA

CÉSAR DEL ÁNGEL HERNÁNDEZ GALENO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2010

La presente tesis titulada: **DIVERSIDAD MORFOLÓGICA Y GENÉTICA DE MAÍZ CACAHUACINTLE EN UNA REGION DE LOS VALLES ALTOS DE PUEBLA**, realizada por el alumno **CÉSAR DEL ÁNGEL HERNÁNDEZ GALENO** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. AMALIO SANTACRUZ VARELA

DIRECTOR:



DR. PEDRO ANTONIO LÓPEZ

ASESOR:



DR. TARSICIO CORONA TORRES

ASESOR:



DRA. YOLANDA SALINAS MORENO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2010.

RESUMEN GENERAL
DIVERSIDAD MORFÓLOGICA Y GENÉTICA DE MAÍZ CACAHUACINTLE EN UNA
REGIÓN DE LOS VALLES ALTOS DE PUEBLA

César del Ángel Hernández Galeno, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010

La raza de maíz Cacahuacintle cuenta con un área propicia para su cultivo en los valles altos del Estado de Puebla, México. Esta raza, en virtud de sus usos especiales, tiene un nicho de mercado favorable en comparación con el maíz de otras razas; sin embargo, existen pocos trabajos que aborden aspectos relacionados con su cultivo y diversidad. Con la finalidad de caracterizar la diversidad genética y la aptitud para preparar pozole de poblaciones criollas de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla se realizó un estudio utilizando variables morfológicas, polimorfismo de isoenzimas, y de caracteres físicos, químicos y variables tecnológicas asociadas con la calidad pozolera. El análisis de varianza arrojó diferencias altamente significativas entre poblaciones para 26 de las 28 variables en estudio, evidenciando la existencia de gran variabilidad morfológica entre las poblaciones. El análisis de agrupamiento permitió detectar tres grupos bien definidos, con 42 alelos encontrados en total y valores promedio de 2.2 alelos por locus, 68.5% de loci polimórficos, heterocigosidad esperada de 0.25, y valores G_{ST} de 80%. El grupo de poblaciones nativas presentó como alelos exclusivos a *Adh1-6*, *Got2-2*, *Idh2-8* y *Phi1-2* los cuales se reportan como alelos distintivos de maíces de Valles Altos y presentó 12% de alelos raros. En la evaluación de la calidad pozolera se observó predominantemente una forma de grano redondeada globosa en tamaño grande, mediano y pequeño. Los valores promedio de las variables físicas del grano en las poblaciones de maíz Cacahuacintle fueron: peso hectolítrico de 60.5 kg hL⁻¹, peso de mil granos de 540.6 g y color de grano con 83.8% de reflectancia. En las variables tecnológicas el tiempo promedio de cocción para reventado de grano fue de 163.9 min, con un porcentaje de floreado de granos de 75.1 y volumen de expansión final de 109.5 cm³. Los menores tiempos de cocción para reventado de grano los presentaron las poblaciones CPue-00472, CPue-00476 y CPue-00477. El contenido de amilosa fue de 21.7% en promedio. La evaluación de viscosidad en harina mostró una temperatura promedio para inicio de formación de pasta de 67.0 °C y una viscosidad máxima promedio al final del ciclo de calentamiento de 3599 cP.

Palabras clave: *Zea mays* L., calidad pozolera, isoenzimas, recursos fitogenéticos, variables tecnológicas.

GENERAL SUMMARY
MORPHOLOGICAL AND GENETIC DIVERSITY OF CACAHUACINTLE MAIZE IN A
REGION OF THE HIGHLANDS OF PUEBLA

César del Ángel Hernández Galeno, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010

The Cacahuacintle maize race has an area appropriate for its cultivation at the highlands of the state of Puebla, Mexico. This race, due to its special use, has a favorable market niche in comparison with other maize races; however, there are few studies on aspects related with its cultivation and diversity. The aim of this work was to characterize the genetic diversity and suitability of landrace populations of Cacahuacintle maize from high valleys of Puebla to prepare ‘pozole’, using morphological traits, polymorphism of isozymes, physical and chemical features and technological variables associated to ‘pozole’ quality. The analysis of variance showed highly significant differences among populations for 26 out of 28 traits, showing the existence of large morphological variability between populations. Cluster analysis allowed to detect three well-defined groups, with a total of 42 alleles found and average values of 2.2 alleles per locus, 68.5% of polymorphic loci, expected heterozygosity of 0.25 and G_{ST} values of 80%. The group of native populations showed *Adh1-6*, *Got2-2*, *Idh2-8* and *Phi1-2* as private alleles, which have been reported as distinctive alleles in maize from the highlands and presented 12% of rare alleles. In the evaluation of ‘pozole’ quality a round balloon-like shape of kernel was observed in three sizes, big, medium and small. The mean value of kernel physical traits in the Cacahuacintle maize populations were: hectoliter weight of 60.5 kg hL⁻¹, weight of one-thousand kernels of 540.6 g and kernel color with 83.8% of reflectance. Regarding the technological variables, the average cooking time for kernel popping was of 163.9 min, with a percentage of popped kernels of 75.1 and final expansion volume of 109.5 cm³. The shortest cooking times for kernel popping were presented by CPue-00472, CPue-00476 and CPue-00477 populations. The amylase content was of 21.7% in average. The flour viscosity test showed a mean temperature of 67.0 °C for the beginning of paste formation and an average maximum viscosity at the end of the heating cycle of 3599 cP.

Key words: *Zea mays* L., pozole quality, isozymes, plant genetic resources, technological variables.

DEDICATORIA

A mis padres: **Rodrigo Hernández Barrera** y **Eulalia Galeno Velázquez** porque ellos fueron los primeros en educarme y lo hicieron muy bien inculcándome valores que han sido un gran sustento para mi vida en sociedad y lo seguirán siendo a lo largo de mi vida.

A mis hermanos: **Gisela, Roxana** (q.e.p.d.), **Kenia, Cuauhtémoc** y **Carlos Alberto** por ustedes siempre quiero ser mejor y son ustedes una de mis principales fuentes de motivación.

A mi tío **Heladio Hernández Barrera** (q.e.p.d.), que siempre me considero como un hijo y yo a él como un segundo padre, estoy seguro que desde donde te encuentras vas a lograr ver el éxito que siempre quisiste para todos nosotros, ¡He aquí un pequeño avance!

A la Sra. Patricia Díaz Hernández y toda su familia por el tiempo y la confianza que me brindaron y por motivarme a realizar esta maestría, muchas gracias, los llevo en el corazón siempre.

A los amigos que en esta etapa de mi vida se reafirmaron y otros que afortunadamente tuve la oportunidad de conocer durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados (Yolanda del Rocio, Morgan, Enrique, Mario, Juan, Amalio, Leobigildo, René, Aremi, Eliel, Fernando, Marian, Gregorio, Huitzimengari, Edgardo y Ángel), y muy en especial a mis compadres Edwin Javier y Andrés Moya.

A todos ellos agradezco su amistad y apoyo brindado.

Al personal de servicios académicos (Lucy, Luciana, Gris, Anita y Carmen) por su amistad y valioso apoyo durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A todos los familiares y amigos que no menciono tengan por seguro que son considerados una fuente muy importante de inspiración para mí y que siempre están presentes en mis pensamientos.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el financiamiento económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al **Colegio de Postgraduados**, especialmente al programa de Genética por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A la **Línea Prioritaria de Investigación 6: Conservación y Mejoramiento de Recursos Genéticos** del Colegio de Postgraduados por el apoyo financiero para la realización del presente trabajo durante el año 2007, a través del proyecto de investigación integrador “Estudio de diversidad genética en la región de los Valles de Libres y Serdán, Puebla”, específicamente al subproyecto “Caracterización y aprovechamiento de la diversidad genética de maíz en la región de Libres y los Llanos de Serdán, Puebla, del cual se derivó la presente investigación.

Al **Dr. Amalio Santacruz Varela** por la confianza que siempre deposito en mi persona y el apoyo en la dirección de la investigación, así como, el tiempo dedicado en la revisión de la tesis.

Al **Dr. Pedro Antonio López** por la gran disposición y aporte para la realización de este trabajo en todas las fases de ejecución.

A la **Dra. Yolanda Salinas Moreno** por la acertada dirección en la parte de análisis de calidad en laboratorio.

Al **Dr. Tarsicio Corona Torres** por su valiosa asesoría y apoyo.

A los **Dres. Javier López Upton y Carlos Ramírez Herrera** por las facilidades concedidas para realizar la determinación isoenzimática en el Laboratorio del Programa Forestal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

A los **Dres. Abel Gil, Higinio López, Pedro Antonio, Oswaldo Taboada, Ernesto Hernández y Juan de Dios**, del Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, por sus enseñanzas, apoyo y amistad que me han brindado de forma desinteresada.

CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN GENERAL.....	iii
GENERAL SUMMARY.....	iv
INDICE DE CUADROS.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	12
2. Objetivos.....	16
3. Hipótesis.....	17
4. Literatura citada.....	18
CAPITULO I. DIVERSIDAD GENÉTICA DE MAÍCES DE LA RAZA CACHUACINTLE EN VALLES ALTOS DE PUEBLA.....	22
1.1 Resumen.....	22
1.2 Summary.....	23
1.3 INTRODUCCIÓN.....	24
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
1.4.1 Caracterización morfológica.....	26
1.4.1.1 Material vegetal y ubicación de los experimentos.....	26
1.4.1.2 Diseño, unidad experimental y conducción de los experimentos.....	26
1.4.1.3 Variables medidas y análisis estadístico.....	27
1.4.2 Evaluación isoenzimática.....	27

1.4.2.1 Material vegetal y protocolo de laboratorio.....	27
1.4.2.2 Análisis de la diversidad genética.....	28
1.4.2.3 Análisis de agrupamiento.....	29
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
1.5.1 Análisis de varianza de datos morfológicos.....	29
1.5.2 Análisis de conglomerados con datos morfológicos.....	30
1.5.3 Análisis de la diversidad genética con isoenzimas.....	34
1.5.4 Análisis de agrupamientos.....	37
1.6 CONCLUSIONES.....	38
1.7 LITERATURA CITADA.....	38

CAPITULO II. CALIDAD POZOLERA DE MAICES DE LA RAZA CACAHUACINTLE DE VALLES ALTOS DE PUEBLA.....	42
2.1 Resumen.....	42
2.2 Summary.....	43
2.3 INTRODUCCIÓN.....	44
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	46
2.4.1 Material genético.....	46
2.4.2 Variables evaluadas.....	46
2.4.2.1 Características morfológicas y físicas del grano.....	46
2.4.2.2 Variables tecnológicas.....	46
2.4.2.3 Variables químicas.....	48
2.4.3 Análisis de la información.....	49

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
2.5.1 Características morfológicas y físicas del grano.....	49
2.5.2 Variables tecnológicas.....	52
2.5.3 Variables químicas.....	55
2.6 CONCLUSIONES.....	58
2.7 LITERATURA CITADA.....	59
III. CONCLUSIONES GENERALES.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1.1 Variables cuantificadas en poblaciones de maíz Cacahuacintle y testigos en Valles Altos de Puebla, 2007.....	28
Cuadro 1.2 Cuadrados medios, media y coeficiente de variación del análisis combinado de 18 variables morfológicas cuantificadas en 36 poblaciones de maíz Cacahuacintle, en tres localidades del estado de Puebla, México. 2007.....	30
Cuadro 1.3 Medias de 16 variables de grupos identificados en maíces de los valles altos en 2007 y comparación con trabajos similares.....	33
Cuadro 1.4 Parámetros de diversidad genética en grupos de identificados en maíces de los valles altos en 2007 con base en 18 loci de isoenzimas.....	34
Cuadro 2.1 Características físicas de grano de 12 poblaciones de maíz cacahuacintle y dos testigos seleccionados para pruebas tecnológicas y características químicas.....	50
Cuadro 2.2 Variables tecnológicas en 12 poblaciones de maíz cacahuacintle y dos testigos.....	53
Cuadro 2.3 Contenido de amilosa y valores obtenidos en la determinación de viscosidad en harina de endospermo de 12 poblaciones de maíz cacahuacintle y una población de la raza cónico.....	56

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Filograma obtenido mediante Agrupamiento de Vecinos (Neighbor-Joining) utilizando 16 caracteres morfológicos en maíces de los valles altos.....	31
Figura 1.2 Filograma de los grupos obtenido mediante el método de Neighbor-Joining utilizando 45 alelos de isoenzimas en poblaciones de maíz de valles altos en 2007.....	37
Figura 2.1 Viscosidad de harinas de endospermo de maíz cacahuacintle con contenido bajo (CPue-00471 y CPue-00473) y alto de amilosa (CPue-00488 y CPue-00487) y los maíces Cónico y Ancho.....	58

1. INTRODUCCION GENERAL

México es considerado el centro de origen del maíz, lo cual aunado a la complejidad y abundancia de regiones ecológicas, así como de grupos étnicos y productores que cultivan poblaciones específicas con muchas variantes propias sometidas a través de la selección a procesos evolutivos muy particulares y dinámicos, hace que México posea una gran diversidad morfológica y genética de poblaciones de maíz. En todo el continente americano se estima que existen unas 250 razas de maíz (Benz, 1986); y de ellas, en México se encuentran más de 75 (Sánchez *et al.*, 2000b); existiendo variedades para cada requerimiento específico, con diferentes aspectos de planta, diferentes adaptaciones a condiciones ambientales, regiones geográficas y tipos de suelo, cultivándose desde el nivel del mar hasta más de tres mil metros de altitud y en climas muy diversos, desde los muy secos hasta los muy húmedos. Lo anterior hace que existan razas que aún no se han estudiado lo suficiente, una de ellas es la raza de maíz Cacahuacintle, la cual pertenece a las razas clasificadas en el complejo piramidal mexicano y que como característica distintiva se cultivan en altitudes superiores a 2000 msnm. Wellhausen *et al.* (1951), en su estudio sobre las razas mexicanas de maíz en México, mencionan que la raza Cacahuacintle sólo se encuentra en algunas localidades de los estados de México, Puebla y Tlaxcala; en el caso de Puebla sólo lo ubicaron en algunas localidades de los municipios de Zacatlán, Teziutlán, Chapulco y Totoltepec; sin embargo, en exploraciones recientes se han localizado poblaciones de esta raza en la región de los Llanos de Serdán; más aún, en las estadísticas nacionales sobre producción de maíz pozolero, el estado de Puebla tiene una participación muy importante, ubicándose en primer lugar en cuanto a rendimiento y volumen de producción (SIAP, 2009).

El análisis de las relaciones entre las poblaciones de especies cultivadas es un componente importante en los programas de mejoramiento, ya que proporciona información acerca de la diversidad genética de esas poblaciones (Mohammadi y Prasanna, 2003), entendiendo a la diversidad como la manifestación de la variación genética presente dentro de una especie o población y entre esas especies o poblaciones.

La diversidad genética se puede cuantificar con diversas metodologías, diferenciándose unas de otras por el tipo de caracteres que utilizan, pudiendo ser de tipo morfológico, citogenético, bioquímico o a nivel de marcadores de ADN; estos caracteres pueden ser utilizados de manera individual o en forma complementaria.

Simpson y Withers (1986) mencionan que una de las principales metodologías para valorar la diversidad genética es aquella que se sustenta en la caracterización morfológica, señalando que en este tipo de caracterización la variación de los órganos reproductivos y la determinación de sus patrones de variación permiten conocer su proceso evolutivo, así como detectar la materia prima para los programas de mejoramiento genético y diseñar estrategias para la conservación. Aunque los caracteres morfológicos han sido tradicionalmente utilizados para estimar la diversidad entre grupos de plantas, se reconoce que son una medida indirecta de la diversidad genética, ya que su expresión es afectada por factores ambientales y por la etapa de desarrollo (Yee *et al.*, 1999). Pese a esas limitaciones los caracteres morfológicos son ampliamente utilizados debido a que no requieren equipo sofisticado ni procedimientos elaborados para su medición (Bretting y Widrechner, 1995). Algunos de los trabajos relevantes que han utilizado los caracteres morfológicos para el estudio de la diversidad en las razas de maíz, tanto a nivel inter como intra-racial son los de Wellhausen *et al.* (1951), Benz (1986), Herrera-Cabrera *et al.* (2004), López-Romero *et al.* (2005), Hortelano *et al.* (2008), entre otros.

En la actualidad los marcadores moleculares y bioquímicos han sido de gran aceptación para evaluar la diversidad entre y dentro de razas de maíz, ya que tienen la ventaja de no ser afectados por el ambiente en el que se desarrollan los organismos y a que se consideran selectivamente neutros, siendo sus cambios el resultado fundamentalmente de la tasa de mutación (Doebley, 1984). Algunas otras ventajas de este tipo de marcadores es que son polimórficos, codominantes, de herencia mendeliana y además se encuentran en todos los tejidos de la planta. Con las isoenzimas se pueden determinar las frecuencias alélicas, permitiendo el cálculo de las distancias genéticas y de esta forma se puede inferir sobre las relaciones sistemáticas entre poblaciones o razas (Doebley, 1990).

Desde el punto de vista de los estudios de diversidad las isoenzimas son un tipo de marcadores bioquímicos que se utilizan para cuantificar la variabilidad existente en maíz y en otras especies a nivel inter o intra poblacional. La literatura disponible sobre este tipo de marcadores, en su conjunto representa una fuente abundante de información molecular (Goodman y Stuber, 1983). A las isoenzimas se les atribuyen tres ventajas importantes sobre los caracteres morfológicos, la primera es que, generalmente, no son afectadas por el ambiente, de tal forma que la variación observada puede atribuirse a una variación genética; la segunda es que las isoenzimas se consideran selectivamente neutras, es decir no son afectadas por la selección, haciendo que la variación observada esté en función de la tasa de mutación, la tercera es que son codominantes, es decir, permiten la detección de los individuos heterocigotos; por lo anterior, las isoenzimas se aceptan como buenos predictores de las relaciones evolutivas en maíz (Doebley *et al.*, 1988).

Mediante la técnica de las isoenzimas se ha estudiado la variación en las razas de maíz de México (Doebley *et al.*, 1985; Sánchez *et al.*, 2000a), así como los patrones de variación

isoenzimática entre maíz y teocintle mexicano (Doebley *et al.*, 1987), la clasificación taxonómica del género *Zea* (Doebley, 1990), las relaciones filogenéticas entre los maíces mexicanos y los del Norte y Sudamérica (Sánchez y Goodman, 1992) y la diversidad isoenzimática de las razas del continente americano (Sánchez *et al.*, 2000b). Recientemente en México se han realizado estudios como la variación isoenzimática en poblaciones de teocintle (Rincón *et al.*, 2005), la diversidad genética y las relaciones filogenéticas en poblaciones de maíz de la Sierra Tarasca de Michoacán (Mijangos, 2005) y se ha establecido el perfil isoenzimático de los maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, en Oaxaca (López *et al.* 2010), entre otros.

Los estudios de diversidad de las razas mexicanas de maíz han orientado su enfoque hacia el estudio de los aspectos morfológicos y genéticos, dejando de lado los caracteres bioquímicos relacionados con la calidad culinaria o de aptitud de uso, aspecto para el cual los maíces nativos o criollos de nuestro país son mayormente utilizados; baste señalar que a nivel mundial México es de los países en los que más del 60% de su producción de maíz es utilizada para la alimentación humana (Paliwal *et al.*, 2001). Coutiño *et al.* (2008) mencionan que hasta hace pocos años, los programas de mejoramiento genético tenían como objetivo principal elevar el rendimiento de grano; sin embargo, la apertura comercial, la competencia de productores nacionales con agricultores extranjeros altamente tecnificados y las necesidades propias de la industria nacional han propiciado que los programas de mejoramiento actualmente incluyan aspectos de calidad industrial y nutricional entre sus objetivos y metas.

A nivel nacional el maíz Cacahuacintle y otros considerados como pozoleros se cultivan en 7,687.5 ha, distribuidas en los estados de Aguascalientes, Guerrero, Estado de México, Morelos y Puebla, ocupando el estado de Puebla el tercer lugar en cuanto a superficie sembrada con 1,722

ha, y el primer lugar en cuanto a producción obtenida en 2008 con 18,940 t, las cuales representan un 45% de la producción nacional de maíz pozolero (SIAP, 2009).

Los maíces pozoleros tienen un papel importante en la economía de los agricultores en las áreas donde son cultivados, ya que el precio del grano para consumo como pozole es más redituable que el del grano normal, lo cual hace que comparativamente los agricultores que siembran este tipo de maíz tengan una actividad agrícola más rentable. González *et al.* (2006) mencionan que el rendimiento del maíz cacahuacintle despuntado fluctúa entre 1500 y 3000 kg ha⁻¹ y en los años de 1996-1999 su precio varió entre \$2.0 y \$9.5 por kilogramo.

Sin embargo, a pesar de que este tipo de maíz es más redituable, no existe una norma que especifique las características que debe de poseer el grano de maíz Cacahuacintle para la elaboración de un pozole de calidad; de manera experimental sólo se tiene el reporte del trabajo de Bonifacio *et al.* (2005) en el cual se plantearon de forma preliminar algunas características que pudieran ser tomadas como referente para establecer los estándares de calidad de un buen maíz pozolero.

2. Objetivos

Con base en los antecedentes mencionados, esta investigación se realizó con los objetivos que se mencionan a continuación.

- a) Caracterizar la diversidad genética existente en poblaciones criollas de la raza de maíz Cacahuacintle en los Valles Altos del estado de Puebla, mediante variables morfológicas y polimorfismo de isoenzimas.

- b) Evaluar los caracteres morfológicos, físicos, químicos y variables tecnológicas asociadas con la calidad pozolera para identificar poblaciones sobresalientes de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla.

3. Hipótesis

- a) Las poblaciones criollas de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla presentan una amplia diversidad genética, expresada tanto a nivel de caracteres morfo-agronómicos como a nivel de polimorfismo de isoenzimas, haciendo necesario el establecimiento de programas de conservación y de mejoramiento genético para su aprovechamiento.
- b) Existe variación suficiente a través de poblaciones en parámetros físico-químicos, que permite realizar de manera eficiente selección hacia poblaciones sobresalientes por sus atributos para elaboración de pozole de alta calidad.

Para alcanzar los objetivos mencionados y contrastar las hipótesis planteadas, la investigación tuvo una estructura dividida en tres fases 1) caracterización morfológica y agronómica de las poblaciones a través de varios ambientes de la zona de estudio, 2) estimación de la diversidad genética en laboratorio mediante el uso de marcadores bioquímicos (isoenzimas), y 3) evaluación de parámetros físico-químicos relacionados con la calidad pozolera de las poblaciones estudiadas. Las dos primeras fases se reportan en el Capítulo I del presente documento, mientras que la fase de evaluación de calidad pozolera se reporta en el Capítulo II.

4. LITERATURA CITADA

- Benz B F (1986)** Taxonomy and evolution of Mexican maize. PhD. Dissertation. University of Wisconsin. Madison, Wisconsin, USA. 433 p.
- Bonifacio V E I, Y Salinas M, A Ramos R, A Carrillo O (2005)** Calidad pozolera en colectas de maíz Cacahuacintle. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28: 253-260.
- Bretting P K, M P Widrlechner (1995)** Genetic markers and plant genetic resources management. *In: Plant Breeding Reviews*. Janick J (ed.) Vol. 13. John Wiley & Sons. New York. USA. pp: 11-86.
- Coutiño E B, G Vázquez C, B Torres M, Y Salinas M (2008)** Calidad de grano, tortillas y botanas de dos variedades de maíz de la raza Comiteco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 9-14.
- Doebley J F (1984)** Maize introgression into teosinte: a reappraisal. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 71: 1100-1113.
- Doebley J F (1990)** Molecular systematic of *Zea* (Gramineae). *Maydica* 35: 143-150.
- Doebley J F, M M Goodman, C W Stuber (1985)** Isozyme variation in races of maize from Mexico. *American Journal of Botany* 72: 629-639.
- Doebley J F, M M Goodman, C W Stuber (1987)** Patterns of isozyme variation between maize and Mexican annual teosinte. *Economic Botany* 42: 234-246.
- Doebley J F, J D Wendel, J S C Smith, C W Stuber, M M Goodman (1988)** The origin of Corn Belt maize: the isozyme evidence. *Economic Botany* 42: 120-131.
- González H A, J Sahagún C, D de J Pérez L, A Domínguez L, R Serrato C, V Landeros F, E Dorantes C (2006)** Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 255-261.
- Goodman M M, C W Stuber (1983)** Races of maize. VI. Isozyme variation among races of maize in Bolivia. *Maydica* 28: 169-187.
- Herrera-Cabrera B E, F Castillo-González, J J Sánchez-González, J M Hernández-Casillas, R A Ortega-Paczka, M Major-Goodman (2004)** Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38: 191-206.

- Hortelano S R R, A Gil M, A Santacruz V, S Miranda C, L Córdova T (2008)** Diversidad morfológica de maíces nativos del Valle de Puebla. *Agricultura Técnica en México* 34: 189-200.
- López-Romero G, A Santacruz-Varela, A Muñoz-Orozco, F Castillo-González, L Córdova-Téllez, H Vaquera-Huerta (2005)** Caracterización morfológica de poblaciones nativas de maíz del Istmo de Tehuantepec, México. *Interciencia* 30: 284-290.
- López R G, A Santacruz V, A Muñoz O, F Castillo G, L Córdova T, H Vaquera H (2010)** Perfil isoenzimático de maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. I. Caracterización de grupos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 1-10.
- Mohammadi S A, B M Prasanna (2003)** Analysis of genetic diversity in crop plants –salient statistical tools and considerations. *Crop Science* 43: 1235-1248.
- Mijangos C J O (2005)** Estudio de la diversidad genética y relaciones filogenéticas en poblaciones de maíz de la sierra Tarasca de Michoacán. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 223 p.
- Paliwal L R (2001)** Usos del maíz. *In: El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*. R L Paliwal, G Granados, H Renée L, A D Violic, J P Marathée (eds). FAO, Roma, Italia. pp: 45-56.
- Rincón E G, P Ramírez V, J J Sánchez G, T A Kato Y (2005)** Variación isoenzimática en poblaciones de teocintle. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28: 105-113.
- Sánchez G J J, M M Goodman (1992)** Relationships among the Mexican races of maize. *Economic Botany* 46: 72-85.
- Sánchez G J J, C W Stuber, M M Goodman (2000a)**. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54: 43-59.
- Sánchez G J J, C W Stuber, M M Goodman (2000b)** Isozymatic diversity in the races of maize of the Americas. *Maydica* 45: 185-203.
- SIAP (2009)** Anuario Agropecuario, 1980-2008. SAGARPA. México, D.F. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=287&Itemid=430 (Consultado 03 de julio de 2010).
- Simpson M J, L A Withers (1986)** Characterization of plant genetic resources using isozymes electrophoresis: a guide to the literature. International Board for Plant Genetic Resources. Rome. 102 p.

Yee E, K K Kidwell, G R Sills, T A Lumpkin (1999) Diversity among selected *Vigna angularis* (Azuki) accessions on the basis of RAPD and AFLP markers. *Crop Science* 39: 268-275.

Wellhausen E J, L M Roberts, E Hernández X, P C Mangelsdorf (1951) Razas de maíz en México: su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D. F. 237 p.

CAPITULO I
DIVERSIDAD GENÉTICA DE MAÍCES DE LA RAZA CACAHUACINTLE EN
VALLES ALTOS DE PUEBLA¹

1.1 RESUMEN

La raza de maíz Cacahuacintle cuenta con un área propicia para su cultivo en los valles altos del Estado de Puebla, México. Esta raza, en virtud de sus usos especiales, tiene un nicho de mercado favorable en comparación con el maíz de otras razas; sin embargo, existen pocos trabajos que aborden aspectos relacionados con su cultivo y diversidad. En este trabajo se estudió la diversidad genética de la raza Cacahuacintle en una región de los valles altos de Puebla por medio de una caracterización morfológica e isoenzimática. Se estudiaron 25 poblaciones de maíz Cacahuacintle nativas de valles altos de Puebla, cuatro de otras regiones del país y dos testigos de otras razas. Se establecieron tres ensayos para la evaluación de campo, en un diseño experimental látice 6×6 con dos repeticiones, midiéndose 28 caracteres morfológicos. El análisis de varianza arrojó diferencias altamente significativas entre poblaciones para 26 de las 28 variables en estudio, evidenciando la existencia de gran variabilidad morfológica entre las poblaciones. El análisis de agrupamiento permitió detectar tres grupos bien definidos, uno de ellos, incluyó la mayoría de las poblaciones nativas, con características típicas de la raza Cacahuacintle, separándolas de los materiales de otras regiones. Los tres grupos conformados en el análisis morfológico presentaron valores promedio para alelos por locus de 2.2; polimorfismo de 68.5%; heterocigosidad esperada de 0.25, y valores G_{ST} de 80%. El grupo de poblaciones nativas presentó como alelos exclusivos a *Adh1-6*, *Got2-2*, *Idh2-8* y *Phi1-2* los cuales se reportan como alelos distintivos de maíces de Valles Altos y presentó 12% de alelos raros. Tanto a nivel

¹ Artículo en revisión en la Revista Fitotecnia Mexicana

inter como intrapoblacional se observó variación morfológica e isoenzimática de las poblaciones nativas de maíz Cacahuacintle, lo cual justifica el diseño y ejecución de un programa de fitomejoramiento orientado a mejorar características agronómicas y de aptitud de uso de dichas poblaciones.

Palabras clave: *Zea mays* L., germoplasma, isoenzimas, maíces nativos, recursos fitogenéticos.

1.2 SUMMARY

Cacahuacintle race of maize has an appropriate area for cultivation at the highlands of the state of Puebla, Mexico. This race has a favourable market niche in comparison with other races because of its attributes for specialty uses; however, there are only a few studies regarding aspects related to its cultivation and genetic diversity. In this work genetic diversity of the Cacahuacintle race was studied in a region of the highlands of Puebla by means of a morphological and isozymatic characterization. Twenty-five Cacahuacintle landraces native to the Puebla highlands were studied along with four Cacahuacintle populations from other regions and checks of other races. Three trials were established for field evaluation under a 6×6 lattice experimental design with two replications, measuring 28 morphological traits. The analysis of variance showed highly significant differences among populations for 26 out of the 28 studied traits. Three well-defined groups were detected by the cluster analysis and one of those included most of the native populations, which showed characteristics typical of the Cacahuacintle race, grouping them apart from materials of other regions. The three groups defined on the basis of morphological characterization showed average values for alleles per locus of 2.2; polymorphism of 68.5%; expected heterocigosity of 0.25, and G_{ST} values of 80%. The group of native populations presented *Adh1-6*, *Got2-2*, *Idh2-8* and *Phi1-2* as exclusive alleles, which have been

reported as distinctive alleles for highland maizes in other studies, having 12% of rare alleles. Morphological and isozymatic variation was observed both within and among Cacahuacintle native maize populations, thus, the design and implementation of a plant breeding program to improve agronomic and quality for special uses of those populations is justified.

Index words: *Zea mays* L., germplasm, isozymes, native maize, plant genetic resources,.

1.3 INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la diversidad de los recursos genéticos de un país es vital para planear con propiedad un aprovechamiento eficiente. En el caso del maíz Doebley *et al.* (1985) y Sánchez *et al.* (2000) mencionan que en las razas mexicanas la caracterización morfológica y genética es un proceso inconcluso, ya que la variación dentro de razas se ha explorado insuficientemente, y prueba de ello es la escasa cantidad de estudios de caracterización dentro de razas en México, pudiéndose citar sólo algunos trabajos para las razas Cónico (Silva, 1992; Com. pers.)², Chalqueño (Herrera-Cabrera *et al.*, 2004), Purépecha (Mijangos-Cortes *et al.*, 2007) y Zapalote Chico (López *et al.*, 2010).

Actualmente existe gran interés por el estudio de las poblaciones nativas de maíz en México, conocidas comúnmente como maíces criollos; en parte, como consecuencia de la promoción de la siembra de maíces transgénicos por empresas transnacionales y el posible impacto que ello tendría sobre las poblaciones nativas del país. En relación con lo anterior, existen algunas razas de maíz, como Cacahuacintle, que tienen un estrato de adaptación muy específico y que no han

² **Silva C, E G (1992)** Estudio agronómico y taxonómico de colecciones de maíz Cónico, su colección central y perspectivas de uso en mejoramiento genético. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. 116 p.

recibido la atención necesaria para conocer su diversidad genética intra-racial, con el fin de detectar complejos genéticos que permitan sentar bases para futuros programas de mejoramiento en esas razas.

El maíz Cacahuacintle es una de las razas en la cual la variación dentro de la misma es poco conocida; sólo se conocen generalidades al respecto, como las referentes a su agrupación en el denominado complejo piramidal mexicano que incluye otras razas como Palomero Toluqueño, Arrocillo Amarillo, Cónico y Chalqueño, las cuales se cultivan en altitudes superiores a 2000 msnm. El maíz Cacahuacintle y otros considerados como pozoleros se cultivan en 7,687 hectáreas distribuidas en los estados de Aguascalientes, Guerrero, Estado de México, Morelos y Puebla, ocupando el estado de Puebla el tercer lugar en cuanto a superficie sembrada con 1,722 ha, y el primero en cuanto a producción obtenida en 2008 con 18,940 toneladas, las cuales representan un 45% de la producción nacional de maíz pozolero (SIAP, 2009).

La forma más popular de consumo del maíz Cacahuacintle es en el platillo típico denominado pozole. El hecho de que este maíz sea utilizado ampliamente para pozole y que su producción esté limitada a una zona restringida por altitud, tiene una implicación favorable para los agricultores que lo cultivan constituyendo una actividad agrícola más rentable que el cultivo de maíz normal (Avilés y Carrasco, Com. Pers.)³. A pesar de la importancia del cultivo de maíz Cacahuacintle se desconoce el grado de diversidad dentro de esta raza; González *et al.* (2006) mencionan que en el maíz Cacahuacintle no se conocen las causas que han contribuido al incremento de su productividad y su variabilidad genética, que permitan identificar poblaciones sobresalientes. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la diversidad

³Avilés C M, Z M T Carrasco (2000) Costos de producción y comercialización del maíz Cacahuacintle en Santa María Nativitas, Municipio de Calimaya, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 93 p.

genética existente en poblaciones criollas de la raza de maíz cacahuacintle en los Valles Altos del estado de Puebla, mediante variables morfológicas y polimorfismo de isoenzimas.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Caracterización morfológica

1.4.1.1 Material vegetal y ubicación de los experimentos

Se emplearon 25 poblaciones locales de maíz Cacahuacintle colectadas en la región de los Valles Altos de Puebla, además de nueve materiales de maíz Cacahuacintle del Estado de México y Tlaxcala y dos testigos de las razas Palomero Toluqueño y Cónico para un total de 36 tratamientos, mismos que fueron evaluados morfológica y agronómicamente en 2007 en las localidades de Santa Cruz Coyotepec, municipio de San Juan Atenco; San Francisco Cuautlancingo, municipio de Chalchicomula de Sesma y San Francisco Independencia, en el municipio de Tlachichuca, todos ellos del estado de Puebla.

1.4.1.2 Diseño, unidad experimental y conducción de los experimentos

Los tratamientos se evaluaron empleando un diseño experimental de látice simple 6×6 con dos repeticiones. La parcela experimental consistió de dos surcos de 5 m de largo y 0.85 m de ancho. Se depositaron tres semillas cada 50 cm y después de seis semanas se realizó un aclareo a dos plantas por mata. Las labores culturales se realizaron de acuerdo al manejo tradicional de la región, incluyendo básicamente dos escardas y tres deshierbes. La dosis de fertilización fue 110-50-00, realizando la aplicación de todo el P y 1/3 de N en la primera escarda, y el N restante durante la segunda escarda.

1.4.1.3 Variables medidas y análisis estadístico

Se midieron 28 variables (Cuadro 1.1), siguiendo los procedimientos de Sánchez-González *et al.* (1993) y Herrera *et al.* (2000) y usando las medias ajustadas se aplicó una prueba de Stepwise por medio de SAS (SAS Institute, 1999), con la finalidad de eliminar variables altamente correlacionadas y evitar así problemas de colinealidad entre variables. Posteriormente se realizó un análisis de varianza conjunto a través de localidades utilizando el procedimiento GLM de SAS, y por último se realizó un análisis de conglomerados con el paquete estadístico NTSYS-pc (Rohlf, 1993) utilizando las medias estandarizadas de las variables seleccionadas.

1.4.2 Evaluación isoenzimática

1.4.2.1 Material vegetal y protocolo de laboratorio

Se incluyeron 25 poblaciones representativas de la diversidad expresada en el análisis morfológico. De cada población se tomaron 12 mm del coleoptilo de 10 plántulas de 6 días de edad para realizar la extracción de las enzimas, las cuales se separaron por electroforesis en geles de almidón siguiendo el protocolo de Stuber *et al.* (1988). Después de la tinción, los geles fueron fotografiados para su posterior lectura. La interpretación de las bandas de los sistemas enzimáticos se realizó tomando como referencia el desplazamiento de los alelos conocidos de las líneas testigo (B73, Mo17 y Mo24W) de acuerdo con las guías de Stuber *et al.* (1988).

Se estudiaron 18 loci isoenzimáticos de los sistemas enzimáticos fosfatasa ácida (*Acp1*), alcohol deshidrogenasa (*Adh1*), catalasa (*Cat3*), esterasa (*E8*), β -glucosidasa (*Glu1*), glutamato oxaloacetato transaminasa (*Got1*, 2 y 3), isocitrato deshidrogenasa (*Idh1* y 2), malato deshidrogenasa (*Mdh1*, 2, 3, 4 y 5), fosfato isomerasa (*Phi1*), y fosfoglucomutasa (*Pgm1* y 2) mismos que se encuentran distribuidos en 8 de los 10 cromosomas del maíz (Stuber *et al.*, 1988).

Cuadro 1.1 Variables cuantificadas en poblaciones de maíz Cacahuacintle y testigos en Valles Altos de Puebla, 2007.

<u>Caracteres agronómicos</u>	<u>Caracteres de mazorca y grano</u>
<i>Días a floración femenina (DFF)</i>	<i>Longitud de la mazorca (LMz) (cm)</i>
Días a floración masculina (DFM)	Número de hileras de la mazorca (NHMz)
Asincronía Floral (Asi)	<i>Número de granos por hilera (NGrH)</i>
<i>Acame de raíz (AR) (escala 1-5[†])</i>	<i>Diámetro de mazorca (DMz) (cm)</i>
Acame de tallo (AT) (escala 1-5 [†])	<i>LMz/DMz</i>
Plantas cuateras (%)	Calificación de mazorca (escala 1-5 [†])
Calificación de planta (Escala 1-5 [†])	<i>Ancho de grano (AGr) (cm)</i>
Rendimiento de grano (kg)	<i>Longitud del grano (LGr) (cm)</i>
	<i>Espesor del grano (EGr) (cm)</i>
	<i>Volumen de Grano (VGr) (cm³)</i>
<u>Caracteres vegetativos</u>	<i>LGr/AGr</i>
<i>Altura de planta (AP) (cm)</i>	<u>Caracteres de la espiga</u>
Altura de mazorca (AM) (cm)	<i>Longitud total (LTE) (cm)</i>
<i>Núm. de hojas arriba de la mazorca (HAMz)</i>	Longitud del pedúnculo (LPE) (cm)
<i>AP/AM</i>	Longitud de rama central (LRCE) (cm)
	Longitud del tramo ramificado (LTRE) (cm)
	<i>Ramas primarias (NRPE)</i>

[†] 1=características más favorables 5=características más desfavorables

1.4.2.2. Análisis de la diversidad genética

Se calcularon las frecuencias génicas poblacionales, porcentaje de loci polimórficos considerando como tales aquellos en los que la ocurrencia del alelo más frecuente no fuera superior al 95%, número de alelos por locus, heterocigosidad esperada por población y la total (H_s y H_t , respectivamente) y el grado de diferenciación genética entre poblaciones, calculado

como $G_{ST} = 1 - (H_s/H_t)$. Para la estimación de estos parámetros se usó el programa POPGENE Versión 1.31 (Yeh *et al.*, 1999).

1.4.2.3 Análisis de agrupamiento

A partir de las frecuencias génicas se generó una matriz de distancias genéticas modificadas de Rogers usando el paquete NTSYS-pc (Rohlf, 1993), con esta matriz se generó un filograma mediante el método de Agrupamiento de Vecinos (Neighbor-Joining) descrito por Saitou y Nei, (1987).

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1 Análisis de varianza de datos morfológicos

Se encontraron diferencias altamente significativas entre poblaciones para todas las variables en estudio –con excepción de LTRE y LRCE–, como se muestra en el Cuadro 1.2. Lo anterior evidencia la existencia de diversidad genética entre las poblaciones en estudio. No obstante, estos resultados difieren de los reportados por González *et al.* (2006), quienes en 30 poblaciones de maíz Cacahuacintle colectadas en cinco localidades de Toluca, Estado de México, encontraron diferencias significativas sólo en cuatro de nueve variables evaluadas. Mijangos *et al.* (2007) y Hortelano *et al.* (2008), en otras razas de maíz de Valles Altos mencionan la existencia de diversidad genética en base a la presencia de diferencias estadísticas entre las poblaciones estudiadas lo cual es acorde con lo encontrado en este trabajo. Lo anterior lleva a señalar que el manejo de germoplasma por parte de los agricultores, a nivel local, ha propiciado un proceso de evolución constante en las poblaciones nativas, lo cual se ve reflejado en el grado de diferenciación fenotípica entre las poblaciones locales.

Cuadro 1.2 Cuadrados medios, media y coeficiente de variación del análisis combinado de 18 variables morfológicas cuantificadas en 36 poblaciones de maíz Cacahuacintle, en tres localidades del estado de Puebla, México. 2007.

Variable	Cuadrados Medios				Media	CV (%)
	Loc.	Pob.	Loc*Pob	Error		
DFM	1834.04**	161.20**	12.95**	7.45	104.85	2.6
DFF	916.45**	148.41**	11.00 ^{ns}	7.67	113.03	2.45
AP	9817.14**	1186.6**	176.72 ^{ns}	165.90	182.51	7.06
AM	2130.76**	812.98**	95.97 ^{ns}	99.53	98.56	10.12
HAMz	0.95**	0.14**	0.10*	0.07	4.45	5.94
NRPE	39.45**	6.78**	3.00 ^{ns}	2.87	6.88	24.60
LPE	266.16**	9.03**	4.75 ^{ns}	4.28	25.10	8.24
LTRE	11569.72**	4.39 ^{ns}	5.15*	3.09	14.28	12.31
LRCE	17689.50**	6.64 ^{ns}	5.76 ^{ns}	4.81	24.77	8.85
LTE	1710.36**	30.89**	16.16 ^{ns}	14.55	64.08	5.95
LMz	23.02**	3.81**	1.80 ^{ns}	1.71	13.14	9.94
DMz	2.17**	0.54**	0.06 ^{ns}	0.04	5.04	4.08
NHMz	13.73**	11.52**	1.13*	0.78	12.03	7.34
NGrH	64.25**	20.36**	7.95*	5.45	21.14	11.04
EGr	0.02**	0.02**	0.001 ^{ns}	0.002	0.54	7.31
LGr	0.08**	0.03**	0.01 ^{ns}	0.01	1.41	5.48
AGr	0.02*	0.09**	0.005 ^{ns}	0.005	1.09	6.20
VGr	0.09**	0.14**	0.01 ^{ns}	0.01	0.84	11.71

** , *= valores significativos al 1 y 5 % respectivamente, ^{ns} = No significativo

1.5.2 Análisis de conglomerados con datos morfológicos

Para definir relaciones de similitud más precisas entre las poblaciones locales de maíz, se generó un dendograma con base en 16 variables seleccionadas (marcadas en *itálicas* en el Cuadro 1.1) mediante el procedimiento Stepwise. A una distancia de corte de 0.275 se identificaron dos

grupos (Figura 1.1); el Grupo 1 incluyó a los testigos Palomero Toluqueño, Cónico y un Cacahuacintle de la región de la Malinche en Tlaxcala, así como, un material nativo de la región de Cuautlancingo, municipio de Chalchicomula de Sesma, Puebla; de forma aislada pero cercana a este grupo se visualizaron dos Cacahuacintles nativos de la región. El Grupo 2 se dividió en dos subgrupos, 2a y 2b. El subgrupo 2a únicamente incluyó poblaciones nativas de la región de estudio, mientras que el subgrupo 2b incluyó dos materiales de la región de la Malinche, Tlaxcala y un Cacahuacintle de Toluca, Estado de México.

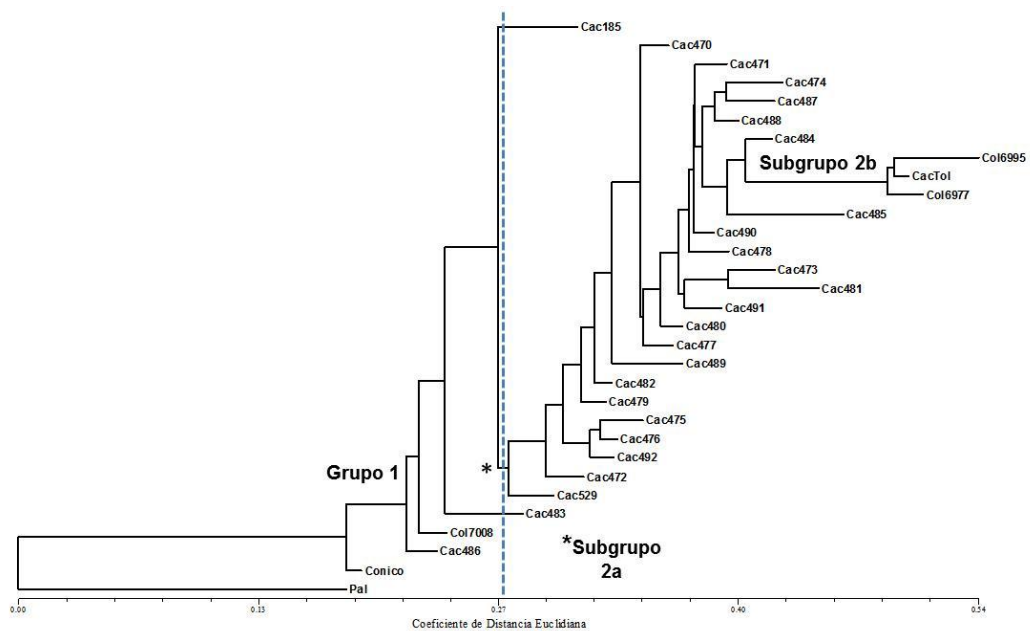


Figura 1.1 Filograma obtenido mediante Agrupamiento de Vecinos (Neighbor-Joining) utilizando 16 caracteres morfológicos en maíces de los valles altos.

Las poblaciones de maíz Cacahuacintle del Grupo 1 presentaron valores similares a los reportados por Wellhausen *et al.* (1951) en ocho de las 16 variables comparadas, y menores a los reportados por Wellhausen *et al.* (1951), González *et al.* (2006, 2008) y Hortelano *et al.* (2008) en las variables AP, LMz y LMz/DMz y valores altos para FM, NRPE y LTE (Cuadro 1.3). En

este grupo se encuentra un material nativo de la región de Valles Altos el cual se colectó en una zona donde, por las condiciones de aislamiento y por la importancia de este tipo de maíz a nivel local, aun se observan poblaciones puras representativas de la raza Cacahuacintle, de ahí la notoria similitud de las variables cuantificadas en este trabajo con las reportadas por Wellhausen *et al.* (1951).

Las poblaciones criollas de los Valles Altos de Puebla concentradas en el subgrupo 2a presentaron valores similares a los reportados por Wellhausen *et al.* (1951) para las variables AP, HAMz, DMz, EGr, LGr y AGr, y superiores en las variables FM, NRPE, LTE y VGr, las cuales en su mayoría son típicos de la raza Cacahuacintle; estos resultados difieren de los encontrados por González *et al.* (2006, 2008), quienes estudiaron poblaciones de maíz Cacahuacintle del Valle de Toluca, Estado de México y de los reportados por Hortelano *et al.* (2008) en su estudio de maíces nativos del Valle de Puebla.

En el subgrupo 2b se observaron en la mayoría de variables valores superiores a los reportados por Wellhausen *et al.* (1951) y en la variable AP valores similares a los reportados por González *et al.* (2006), en este grupo se encuentra un material proveniente de Toluca, Estado de México. Para AGr y VGr los valores fueron similares a los mencionados por Hortelano *et al.* (2008).

Los resultados obtenidos permiten apreciar un cierto grado de diferenciación de los materiales nativos de los Valles Altos de Puebla, con los de otras regiones, y cierta similitud con la caracterización original de Wellhausen *et al.* (1951), lo que permite inferir que las poblaciones de esta región mantienen en mayor grado su pureza genética respecto a las poblaciones de otras regiones; en otras razas no se presenta concordancia tan marcada entre variables morfológicas de las poblaciones actuales con aquellas reportadas en las accesiones que sirvieron de base para la

descripción racial realizada por Wellhausen *et al.* (1951), hecho atribuido principalmente a su mayor distribución geográfica.

Cuadro 1.3 Medias de 16 variables de grupos identificados en maíces de los valles altos en 2007 y comparación con trabajos similares.

Variable	Gpo. 1	Subgrupo 2a	Subgrupo 2b	Palomero	Cónico	W [†]	G ^{††}	G [‡]	H ^{‡‡}
FF	113	111	125	105	115	-	-	-	95
FM	103	103	117	97	108	93	-	94.3	90
AP	172.1	183.8	214.4	134.1	171.5	180.0	239.0	270.0	300.8
HAMz	4.3	4.5	4.7	4.4	4.0	4.2	-	-	-
NRPE	6.8	7.1	8.3	3.2	6.9	5.6	-	-	-
LTE	63.9	64.2	63.9	55.4	64.5	36.8	-	-	42.5
LMz	13.2	13.2	13.9	9.7	12.3	14.5	13.7	14.3	-
DMz	5.0	5.2	4.9	3.4	4.5	4.7	5.5	5.5	4.7
NGrH	21	20	26	27	22	-	-	-	-
EGr	0.5	0.6	0.4	0.3	0.5	0.5	-	-	-
LGr	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.4	-	-	1.4
AGr	1.1	1.2	0.9	0.5	1.0	1.0	-	-	0.9
Vgr	0.8	0.9	0.5	0.2	0.6	0.7	-	-	0.6
LMz/DMz	2.7	2.5	2.9	2.9	2.7	3.1	-	-	-
AP/AM	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	-	-	-	-
LGr/Agr	1.3	1.3	1.7	2.4	1.3	1.4	-	-	-

[†] Wellhausen *et al.* (1951) ^{††} González *et al.* (2006), [‡] González *et al.* (2008), ^{‡‡} Hortelano *et al.* (2008)

1.5.3 Análisis de la diversidad genética con isoenzimas

El grupo 1 y los subgrupos 2a y 2b presentaron un rango de 37 a 42 alelos, con una variación de alelos por locus de 2.1 a 2.3 (Cuadro 1.4), las poblaciones de este grupo y de los subgrupos incluyeron básicamente poblaciones de maíz Cacahuacintle de Puebla, Estado de México y Tlaxcala. Lo anterior denota para las poblaciones nativas de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla similitud con poblaciones de otros estados del país en cuanto a su variabilidad genética estimada con isoenzimas y presentan cierta semejanza a los resultados obtenidos por Doebley *et al.* (1985), quienes reportan un número total de 44 alelos en maíz Cacahuacintle; Sánchez *et al.* (2000) en la misma raza ubicaron 103 alelos por raza y 72 alelos por accesión, con un número promedio de alelos que varía desde 1.5 hasta 3.4. En otras razas de maíz como Zapalote Chico, López *et al.* (2010) reportan 49 alelos distribuidos en 40 poblaciones estudiadas, con un promedio de 2.4 alelos por locus.

Cuadro 1.4 Parámetros de diversidad genética en grupos de identificados en maíces de los valles altos en 2007 con base en 18 loci de isoenzimas.

	NAL [†]	Het. Obs. ^{††}	Het. Esp. [‡]	%LP ^{‡‡}	G _{ST}
Grupo 1	2.1	0.12	0.25	66.7	0.26
Subgrupo 2a	2.3	0.13	0.23	72.2	0.14
Subgrupo 2b	2.1	0.11	0.26	66.7	0.21
Media	2.17	0.12	0.25	68.53	0.20
Palomero	1.6	0.09	0.20	50.0	-
Cónico	1.6	0.11	0.20	44.4	-
Media	1.6	0.10	0.20	47.2	-

[†]Número de alelos por locus; ^{††}Heterocigosidad observada; [‡]Heterocigosidad esperada; ^{‡‡}Porcentaje de loci polimórficos (criterio del 95 %).

Únicamente los subgrupos 2a y 2b presentaron alelos exclusivos, los alelos *Adh1-6*, *Got2-2*, *Idh2-8* y *Phi1-2* se encontraron en el primero y *Pgm2-12* en el segundo. El grupo 1 y los subgrupos 2a y 2b presentaron altas frecuencias relativas para los alelos *Cat3-9*, *Got1-4* y *Phi1-4*. El grupo 1, con respecto al resto de los grupos, presentó el mayor número de alelos con frecuencias relativas altas incluyendo los alelos *Acp1-2*, *Glu1-6*, *Idh2-4* y *Pgm2-8*. Doebley *et al.* (1985) reportaron 22 alelos correlacionados significativamente con altitud, de los cuales *Idh2-4*, *Acp1-2*, *Phi1-2* y *Phi1-4* presentaron altas frecuencias relativas en este trabajo. Sánchez *et al.* (2000) reportaron como una característica isoenzimática de los maíces de Valles Altos la presencia del alelo *Acp1-2* en frecuencias superiores al 80%, el cual en este estudio fue encontrado en las poblaciones de maíz Cacahuacintle en frecuencias de 66 a 76%. El subgrupo 2a que incluye a las poblaciones nativas presentó frecuencias relativas mayores que las del grupo 1 y que del subgrupo 2b, para los alelos *Est8-5* y *Pgm2-4*.

El polimorfismo en el Grupo 1 y en los subgrupos 2a y 2b se observó en un rango de 12-13 loci de los 18 estudiados, lo cual representa un polimorfismo de 66.6 a 72.2%. El valor de 72.2% de polimorfismo fue para el agrupamiento 2a que incluye a la mayoría de las poblaciones nativas de maíz Cacahuacintle de Valles Altos de Puebla. Doebley *et al.* (1985) mencionan un 65% de loci polimórficos para la raza Cacahuacintle; Sánchez *et al.* (2000) para la misma raza encontraron un 75.7% de polimorfismo, mientras que en la raza de maíz Zapalote Chico se reportan porcentajes de polimorfismo del 58%. (López *et al.*, 2010). El grado de polimorfismo detectado en las colectas de este trabajo demuestra una amplia variación genética, similar o mayor a la encontrada por otros autores en la misma raza y en otras razas de maíz en México.

Los alelos raros con frecuencia menor a 0.05 sólo se presentaron en el subgrupo 2a en un 12% y fueron observados en los alelos *Adh1-6*, *Got2-2*, *Idh2-4.2*, *Idh2-8* y *Phi1-2*. Respecto a este

parámetro, investigaciones realizadas en una sola raza de maíz reportan diversos valores, Revilla y Tracy (1995) obtuvieron 22% en poblaciones de maíz dulce, Santacruz-Varela *et al.* (2004) mencionan un 8% en maíces palomeros y López *et al.* (2010) mencionan 23% para 50 poblaciones de Maíz Grande y Zapalote Chico, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.

La heterocigosidad esperada en el Grupo 1 y en los subgrupos 2a y 2b varió en una amplitud de 0.23 a 0.26 y en los testigos raciales fue de 0.20 (Cuadro 1.4). Doebley *et al.* (1985) y Sánchez *et al.* (2000) reportan valores iguales a los aquí obtenidos para la raza de maíz Cacahuacintle.

La G_{ST} en las poblaciones nativas de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla incluidas en el subgrupo 2a denotó que 86% de la variación isoenzimática reside dentro de poblaciones y sólo el 14% entre ellas, en cambio las poblaciones incluidas en el Grupo 1 y en el subgrupo 2b presentaron valores de variación isoenzimática dentro de poblaciones de 74 y 79% respectivamente (Cuadro 1.4). Doebley *et al.* (1985) estudiando 34 razas mexicanas de maíz encontraron una variación entre colecciones del 28%, en tanto que Sánchez *et al.* (2000) reportan en poblaciones de la raza Cacahuacintle un 87% de variación isoenzimática dentro de poblaciones y 13% entre ellas. Lu *et al.* (2002) al evaluar 2000 poblaciones colectadas en el suroeste de China reportaron una variación entre poblaciones del 28% y 72% dentro de ellas, López *et al.* (2010) en un estudio a nivel intrarracial de Zapalote Chico reportaron valores de G_{ST} de 0.126 atribuyendo el bajo valor a un área pequeña de exploración al momento de realizar las colectas lo cual es acorde con los resultados de este trabajo.

1.5.4 Análisis de agrupamientos

Para definir relaciones de similitud más precisas entre los maíces nativos, se generó un filograma (Figura 1.2) utilizando 45 alelos de isoenzimas y los grupos diferenciados en el análisis morfológico. Los grupos con poblaciones de maíz Cacahuacintle se ubicaron en el extremo superior, el maíz Cónico en el centro y el Palomero Toluqueño en el extremo inferior, Wellhausen *et al.* (1951) mencionan que el maíz cónico es el resultado de la hibridación entre Palomero Toluqueño y Cacahuacintle.

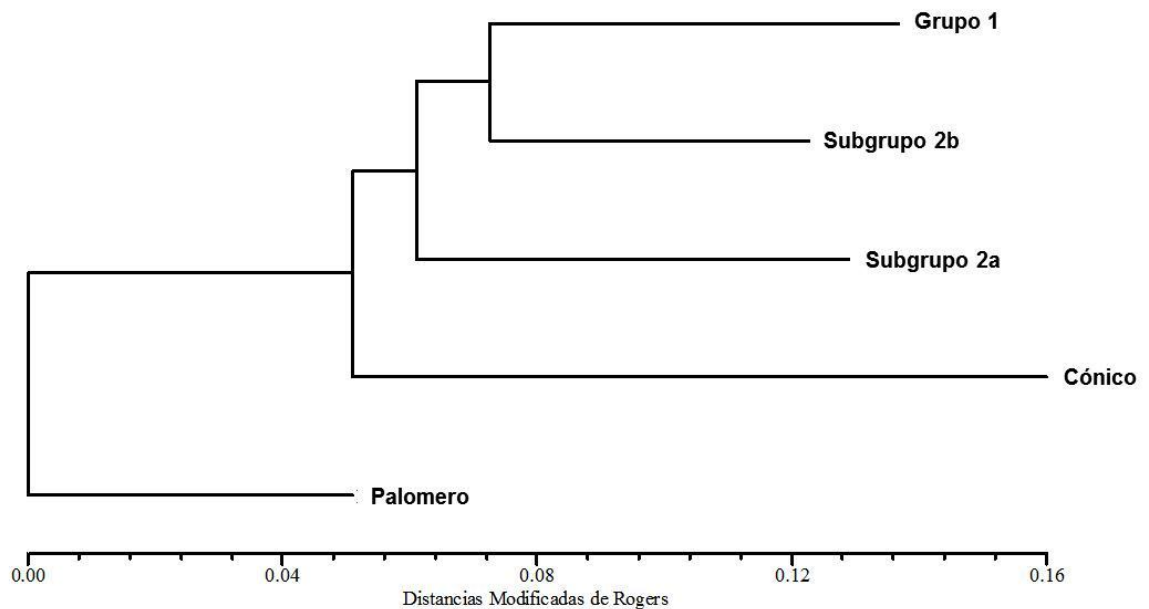


Figura 1.2 Filograma de los grupos obtenido mediante el método de Neighbor-Joining utilizando 45 alelos de isoenzimas en poblaciones de maíz de valles altos en 2007.

El Grupo 1, conteniendo tres poblaciones nativas de los Valles Altos de Puebla y una de Tlaxcala, se ubicó en el extremo superior, seguido del subgrupo 2b el cual contiene una población de maíz Cacahuacintle de Toluca, Estado de México y dos de Tlaxcala, lo anterior

implica que estas poblaciones a nivel isoenzimático presentan mayor similitud, lo cual se observó en los parámetros de diversidad genética anteriormente mencionados. El subgrupo 2a, incluyendo a la mayoría de poblaciones nativas de los Valles Altos de Puebla quedó más próximo al testigo cónico y palomero evidenciando un patrimonio genético diferente al de las poblaciones del Grupo 1 y del subgrupo 2b.

1.6 CONCLUSIONES

Los maíces de la raza Cacahuacintle de la región de los Valles Altos de Puebla, mostraron características distintivas que los ubicaron como un grupo consolidado, tanto en los análisis morfológicos como en los bioquímicos, con respecto a muestras de maíz Cacahuacintle con origen en otros estados donde se cultivan poblaciones de esta raza. A nivel intrapoblacional, el grupo de poblaciones nativas de Valles Altos de Puebla denotó la existencia de diversidad genética sustentada en el número de alelos encontrados (42), el porcentaje de polimorfismo (72%), número de alelos raros (12%) y valores de G_{ST} (0.14). Lo anterior justifica la planeación y ejecución de un programa de fitomejoramiento orientado a mejorar características agronómicas y de aptitud de uso en las poblaciones criollas de esta raza, en los Valles Altos del Estado de Puebla.

1.7 LITERATURA CITADA

- Doebley J F, M M Goodman and C W Stuber (1985)** Isozyme variation in races of maize from Mexico. *American Journal of Botany* 72: 629-639.
- González H A, J Sahagún C, D J Pérez L, A Domínguez L, R Serrato C, V Landeros F, E Dorantes C (2006)** Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 255-261.

- González H A, L M Vázquez G, J Sahagún C, J E Rodríguez P (2008)** Diversidad fenotípica de variedades e híbridos de maíz en el Valle Toluca-Atlacomulco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 67-76.
- Herrera C B E, F Castillo G, J J Sánchez G, R Ortega P, M M Goodman (2000)** Caracteres morfológicos para valorar diversidad entre poblaciones de maíz en una región: caso la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23: 335-354.
- Herrera-Cabrera B E, F Castillo-González, J J Sánchez-González, J M Hernández-Casillas, R Ortega-Paczka, M M Goodman (2004)** Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38: 191-206.
- Hortelano S R R, A Gil M, A Santacruz V, S Miranda C, L Córdova T (2008)** Diversidad morfológica de maíces nativos del Valle de Puebla. *Agricultura Técnica en México* 34: 189-200.
- López R G, A Santacruz V, A Muñoz O, F Castillo G, L Córdova T, H Vaquera H (2010)** Perfil isoenzimático de maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. I. Caracterización de grupos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 1-10.
- Lu H, J S Li, J L Liu, R Bernardo (2002)** Allozyme polymorphisms of maize populations from southwestern China. *Theoretical and Applied Genetics* 104: 119-126.
- Mijangos-Cortes J O, T Corona-Torres, D Espinosa-Victoria, A Muñoz-Orozco, J Romero-Peñaloza, A Santacruz-Varela (2007)** Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Michoacan, Mexico and the *Chalqueño* complex. *Genetics Resources and Crop Evolution* 54: 309-325.
- Revilla P, W F Tracy (1995)** Isozyme variation and phylogenetic relationships among open-pollinated sweet corn cultivars. *Crop Science* 35: 219-227.
- Rohlf F J (1993)** NTSYS-pc Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System. Version 1.8. Exeter Software. Setauket, NY, USA.
- Saitou N, M Nei (1987)** The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution* 4: 406-425.
- Sánchez-González J J, M M Goodman, O Rawlings (1993)** Appropriate characters for racial classification in maize. *Economic Botany* 47: 44-59.
- Sánchez G J J, M M Goodman, C W Stuber (2000)** Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany* 54: 43-59.

- Santacruz-Varela A, M P Widrlechner, R J Salvador, K E Ziegler, M J Millard, P K Bretting (2004)** Phylogenetic relationships among North American popcorns and their evolutionary links to Mexican and South American popcorns. *Crop Science* 44: 1456-1467.
- SAS Institute (1999)** The SAS[®] System for Windows[®] (Ver. 8.0). SAS Institute Inc. Cary. NC.
- SIAP (2009)** Anuario Agropecuario, 1980-2008. SAGARPA. México, D.F. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=287&Itemid=430 (Consultado 03 de julio de 2010).
- Stuber C W, J F Wendel, M M Goodman, J S C Smith (1988)** Techniques and scoring procedures for starch gel electrophoresis of enzymes from maize (*Zea mays* L.). North Carolina Agric. Res. Ser. Tech. Bull. 286. North Carolina State University. Raleigh, NC. 87 p.
- Yeh C F, R Yang, T Boyle (1999)** POPGENE Version 1.31. Microsoft Windows-based Freeware for Population Genetic Analysis. Quick User Guide. University of Alberta and Center for International Forestry Research, Edmonton, AB. Canada. 29 p.
- Wellhausen E J, L M Roberts, E Hernández X, P C Mangelsdorf (1951)** Razas de maíz en México: su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D. F. 237 p.

CAPITULO II

CALIDAD POZOLERA DE MAICES DE LA RAZA CACAHUACINTLE DE VALLES

ALTOS DE PUEBLA⁴

2.1 RESUMEN

La raza de maíz Cacahuacintle, por estar confinada a nichos ecológicos muy específicos ha sido mínimamente estudiada a nivel intra-racial; sin embargo, esta limitación aunada a que tiene un uso culinario muy específico en la gastronomía mexicana la convierten en una opción agrícola rentable para los agricultores de los Valles Altos de México. El presente trabajo se enfocó a la cuantificación de caracteres morfológicos, físicos, químicos y de variables tecnológicas asociadas con la calidad pozolera de 25 poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla, a fin de identificar poblaciones sobresalientes con potencial para incluirse en programas de mejoramiento genético. La forma de grano predominante fue redondeada globosa en tamaño grande, mediano y pequeño, las cuales son típicas del maíz Cacahuacintle y tienen relación estrecha con el tiempo de cocción para reventado de grano, considerado como una de las principales características de calidad pozolera. Los valores promedio de las variables físicas del grano en las poblaciones de maíz estudiadas fueron: peso hectolítrico de 60.5 kg hL⁻¹, peso de mil granos de 540.6 g y color de grano con 83.8% de reflectancia. En las variables tecnológicas el tiempo promedio de cocción para reventado de grano fue de 163.9 min, con un porcentaje de floreado de granos de 75.1 y un volumen de expansión final de 109.5 cm³. Los menores tiempos de cocción para reventado de grano los presentaron las poblaciones CPue-00472, CPue-00476 y CPue-00477. El contenido de amilosa fue de 21.7% en promedio. La evaluación de viscosidad en

⁴ Artículo en proceso de ser enviado a Revista Agrocencia

harina mostró una temperatura promedio para inicio de formación de pasta de 67.0 °C y una viscosidad máxima promedio al final del ciclo de calentamiento de 3599 cP.

Palabras clave: *Zea mays* L., maíz de uso especial, calidad culinaria, diversidad genética, germoplasma.

2.2 SUMMARY

Because of its limited adaptation to specific ecological niches, Cacahuacintle maize race has been scarcely studied at the intra-race level; however, such limitation, along with its specialty culinary use in Mexican gastronomy foster Cacahuacintle maize as a profitable option to the Mexican farmers of the highlands. This study focused on quantification of morphological, physical, chemical, and technological characteristics related to pozole quality of 25 Cacahuacintle maize populations from Puebla State Highlands, with the aim of identifying outstanding populations with potential to be included in plant breeding programs. The prevalent shape of the kernels was rounded balloon-like in big, medium, and small size, which is typical of Cacahuacintle maize and has a close relationship with cooking time for kernel popping, which is considered as one of the most important characteristics related to pozole quality. Average values for physical traits among the studied populations were as follows: 60.5 kg hL⁻¹ for hectoliter weight, 540.6 g for one-thousand kernel weight, and 83.8% of reflectance for kernel color. Regarding technological characteristics, the average cooking time for kernel popping was 163.9 min, with 75.1% of popped grains, and final expansion volume of 109.5 cm³. Accessions CPue-00472, CPue-00476 and CPue-00477 showed the shortest cooking time for kernel popping. Amylose content was 21.7 as an average. Evaluation of viscosity of maize flour showed an

average temperature of 67.0 °C for the beginning of paste formation, and an average of maximum viscosity at the end of the heating cycle of 3599 cP.

Keywords: *Zea mays* L., specialty corn, culinary quality, genetic diversity, germplasm.

2.3 INTRODUCCION

En los estudios de diversidad de las razas mexicanas de maíz el enfoque principal hasta ahora ha sido hacia el estudio de aspectos morfológicos y genéticos, dejando de lado los de composición química y calidad culinaria, no obstante que este último aspecto es relevante en México, donde los maíces nativos son mayormente utilizados para consumo humano directo, con más del 60% de su producción utilizada para este fin (Paliwal, 2001); sin embargo, factores tales como la apertura comercial, la competencia de productores nacionales con agricultores extranjeros más tecnificados y las necesidades propias de la industria nacional han propiciado que los programas de mejoramiento comiencen a considerar aspectos de calidad para uso final de los maíces (Coutiño *et al.*, 2008).

A nivel nacional el maíz Cacahuacintle y otros considerados como pozoleros se cultivan en 7,687.5 ha, distribuidas en los estados de Aguascalientes, Guerrero, Estado de México, Morelos y Puebla, siendo el Estado de Puebla el tercero en superficie sembrada con 1,722 ha, y el primero en cuanto a producción en 2008 con 18,940 t las cuales representan un 45% de la producción nacional de maíz pozolero (SIAP, 2009).

En general, la raza de maíz Cacahuacintle ha sido poco estudiada a nivel intra-racial, debido a que se ubica en nichos ecológicos muy específicos, delimitado por la altitud, cultivándose sólo en zonas del altiplano central de México ubicadas a más de 2000 msnm, lo que aunado al uso

arraigado en la cultura culinaria mexicana para la elaboración del pozole como platillo típico, lo convierte en una opción más rentable que el cultivo de maíz normal (González *et al.*, 2006).

Hasta ahora no existe una norma de calidad que especifique las características que debe poseer el grano de maíz Cacahuacintle para elaborar un buen pozole. Del trabajo de Bonifacio *et al.* (2005) se sabe que las variables físicas del grano como forma y tamaño, peso hectolítrico y densidad están asociadas con características de calidad como el tiempo de cocimiento requerido para el floreado del grano. Lograr esta condición en el grano requiere que los gránulos de almidón del endospermo se hinchen de tal forma que el grano se abra y el germen, que por su naturaleza lipídica prácticamente no absorbe agua, se desprenda, favoreciendo que el grano se “flore”. La velocidad con que los gránulos de almidón se hinchan está relacionada con la proporción de amilosa:amilopectina en el almidón, ya que la amilopectina tiene un mayor poder de hinchamiento que la amilosa (Ansari *et al.*, 2010) y en el almidón de maíces harinosos se ha reportado una mayor proporción de amilopectina (Dombrink-Durtzman y Knutson, 1997; Utrilla-Coello *et al.*, 2010) que en el de granos duros (vítreos), por lo que este conocimiento puede ser usado para explorar la utilidad de las características del almidón en la calidad para pozole del maíz Cacahuacintle.

El objetivo del presente trabajo es determinar la calidad pozolera de una muestra de poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla, en función de caracteres morfológicos del grano y variables tecnológicas, físicas, químicas y reológicas.

2.4 MATERIALES Y METODOS

2.4.1 Material genético

Se utilizaron 25 poblaciones de maíz Cacahuacintle colectadas en 2007 en la región de los Valles Altos de Puebla, diez de Cacahuacintle del Estado de México y Tlaxcala, y una población de maíz Ancho del Estado de Guerrero.

2.4.2 Variables evaluadas

2.4.2.1 Características morfológicas y físicas del grano

La forma de grano se determinó en forma visual del total de la muestra siguiendo los criterios de Bonifacio *et al.* (2005), las categorías asignadas fueron: redondeada (R), redondeada globosa (RG), apastillado triangular (AT) y alargado apastillado (AA). Se determinaron el peso hectolítrico (PH) y la humedad del grano (HGr) con los métodos 84-10 y 44-10, aprobados por la AACC (1976). Se cuantificó el peso de 100 granos obtenidos al azar en cada población en una balanza semianalítica Sartorius modelo BL610, y después se multiplicó por diez para obtener el peso de mil granos (PMG). El color de grano (CGr), expresado como la reflectancia (%), se midió en un colorímetro tipo Agtron 500-A, a una longitud de onda de 546 nm (color verde).

2.4.2.2 Variables tecnológicas

Se determinaron de acuerdo con la metodología propuesta por Bonifacio *et al.* (2005). El procedimiento se inició con la nixtamalización de 50 g de grano durante 20 minutos a ebullición, con 0.7 % de cal y una relación de agua: grano de 2:1. Una vez nixtamalizadas, las muestras se dejaron reposar por 14 a 16 horas y transcurrido este tiempo se eliminó el nejayote, y el nixtamal

se lavó con agua corriente hasta eliminar todo el pericarpio. A los granos se les eliminó manualmente el pedicelo con ayuda de un bisturí; después, se pesó el grano de cada muestra y se midió su volumen en una probeta de 250 mL. Las muestras se colocaron en un vaso de precipitados de 600 mL, se agregaron 140 mL de agua y se sometieron a cocción a temperatura de ebullición. Se midió el tiempo de cocción para reventado de grano (TCpRG) a partir del inicio de la ebullición plena hasta que al tomar al azar cinco granos de la muestra, tres de ellos ya estaban “floreados” o “reventados”, es decir, que más del 50% de los granos cumplieran con dicha característica. Las muestras se dejaron enfriar para separar los granos del caldo de cocimiento. Se contabilizó el número total de granos reventados y se expresó en porcentaje (PGR). El volumen de expansión (VEx) se calculó como la diferencia entre el volumen inicial (grano nixtamalizado) y el volumen final (grano “reventado”).

Se cuantificó la pérdida de sólidos (PS) en porcentaje, para ello el caldo de cocimiento se aforó con agua a un volumen constante para todas las muestras y luego de agitar la muestra para homogeneizarla, se tomó una alícuota de 15 mL que se depositó en un vaso de precipitados de 25 mL (puesto previamente a peso constante) y se colocó en una estufa a 60°C durante 14-16 h, hasta peso constante; una vez fuera de la estufa, la muestra se dejó enfriar en un desecador, para posteriormente ser pesada en una balanza semianalítica. El porcentaje de pérdida de sólidos se calculó por diferencia de pesos e incluye tanto los sólidos solubles como los suspendidos.

Se midió la viscosidad del caldo de cocción (VCC) con el viscosímetro de Ostwald, utilizando el caldo de cocción remanente del análisis anterior. El caldo se calentó unos minutos para facilitar su filtrado, que se realizó con papel filtro (Whatman No. 4). De la muestra filtrada se tomaron 5 mL y se colocaron en el viscosímetro, registrando el tiempo requerido para el paso del líquido a través de la burbuja del instrumento. La referencia utilizada fue el tiempo que tarda el

agua a 26 °C en pasar por la burbuja. El resultado se expresó en términos de viscosidad relativa, al dividir el tiempo de la muestra entre el tiempo de referencia del agua.

2.4.2.3 Variables químicas

Se determinó el contenido de amilosa en el endospermo del grano, por lo que fue necesario retirar las estructuras de pico, pericarpio y germen con ayuda de un bisturí, antes de molerlo en un molino IKA (Werke MF 10 basic), con malla 0.5 mm para obtener la harina. Se disolvieron 20 mg de muestra en 8 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) al 90 %. La mezcla se agitó por 20 min y se calentó 15 min en un baño de agua a 85 °C. La disolución se enfrió a temperatura ambiente durante 20 min y después se aforó a 25 mL con agua destilada. Se tomó 1 mL de la muestra y se le adicionaron 40 mL de agua destilada y 5 mL de solución I₂-KI (I₂ 2.5 mM y KI 6.5 mM), se ajustó el volumen a 50 mL con agua destilada y se dejó reposar 15 min a temperatura ambiente (Hoover y Ratnayake, 2002). La absorbancia se leyó en un espectrofotómetro a 600 nm. Se preparó una curva estándar de mezclas de amilosa y amilopectina (en un intervalo de 0-100% de amilosa) para realizar los cálculos.

Se hizo una determinación de las propiedades de formación de pasta en harina obtenida del endospermo del grano crudo, la cual se obtuvo al moler el endospermo en un molino ciclónico (IKA Werke MF 10 basic). Se tomó una muestra de 3.5 g de harina y se ajustó a 14% de humedad, se colocó en un recipiente de aluminio y se le adicionó agua destilada hasta lograr un peso de 28 g. La prueba se realizó en un analizador (Rapid Visco Analyzer, Newport Scientific Pty. Warriewood, Australia). De la curva resultante de la prueba se obtuvieron las variables temperatura de inicio de formación de pasta (TIFP) en °C, viscosidad máxima al final del ciclo

de calentamiento (VMc) y viscosidad final del ciclo de enfriamiento (VFe), ambas expresadas en centipoises (cP).

2.4.3 Análisis de la información

La información se analizó mediante un análisis de varianza utilizando el modelo lineal correspondiente a un diseño experimental completamente al azar con dos repeticiones, excepto para las variables TIFP, VMc y Vfe en las que sólo se tomó una observación sin someterse a análisis. Se utilizó la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias y se hizo un análisis de correlación entre variables, todo ello utilizando el paquete SAS (SAS Institute, 1999).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSION

En las variables sometidas a análisis estadístico se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en PMG, PH, CGr, TCpRG, PGR, PS y contenido de amilosa. Las variables que no presentaron diferencias significativas fueron el volumen final de granos reventados y la viscosidad del caldo de cocción.

2.5.1 Características morfológicas y físicas del grano

Un 86% de las poblaciones estudiadas presentaron la forma de grano redondeada globosa, la cual de acuerdo con Wellhausen *et al.* (1951) es la forma característica de los granos de maíz Cacahuacintle y la que en su mayoría reportan Bonifacio *et al.* (2005). Las poblaciones restantes presentaron granos con forma apastillada triangulada y apastillada alargada en una proporción de 8 y 6% respectivamente. En estos últimos dos grupos quedaron incluidas las poblaciones testigo de maíz Cónico y maíz Ancho (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Características físicas de grano de 12 poblaciones de maíz Cacahuacintle y dos testigos seleccionados para pruebas tecnológicas y características químicas.

Genealogía	PH[†] (kg hL⁻¹)	PMG^{††} (g)	CGr[‡] (%)	Forma de grano	Tamaño de grano
CPue-00471	62.4b	485.0bc	74.0bc	RG	Grande
CPue-00473	60.1b	527.7bc	86.5a	RG	Grande
CPue-00470	59.4b	569.1bc	83.5ab	RG	Mediano
CPue-00477	58.6b	571.1bc	84.5a	RG	Mediano
CPue-00482	57.0b	570.4bc	79.0abc	RG	Mediano
P2	58.8b	527.1bc	87.5a	RG	Mediano
CPue-00472	56.4b	535.5bc	86.5a	RG	Pequeño
CPue-00474	59.9b	474.8c	85.5a	RG	Pequeño
CPue-00475	57.3b	598.5b	81.0abc	RG	Pequeño
CPue-00476	56.5b	554.8bc	86.5a	RG	Pequeño
CPue-00487	59.5b	532.0bc	88.0a	RG	Pequeño
CPue-00488	59.0b	541.4bc	82.5ab	RG	Pequeño
T1-Cónico	79.0a	303.1d	87.5a	AT	Pequeño
T2-Maíz Ancho	63.8b	792.2 ^a	72.0c	AT	Grande
DSH (0.05)	8.9	122.9	9.8		

Medias con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

[†] Peso hectolítrico ^{††} Peso de mil granos [‡] Color de grano

Las variables PMG, PH y CGr (Cuadro 2.1) presentaron diferencias significativas entre genotipos ($P \leq 0.05$). Los valores obtenidos para PMG variaron en una amplitud de 454 a 612 g en maíces de los Valles Altos de Puebla, para maíz Cacahuacintle del Estado de México y Tlaxcala la variación fue de 359 a 581 g, en maíz Cónico el PMG fue de 303 g y para maíz Ancho de 797 g. El peso de mil granos es un indicador del tamaño de grano, teniéndose mayores valores para

granos más grandes. Los resultados obtenidos en este trabajo para maíz Cacahuacintle son similares a los reportados por Mauricio *et al.* (2004) quienes reportan valores de 379 y 460 g para las accesiones Mex-7 y Ver-383 de maíz Cacahuacintle, y concuerdan también con los obtenidos por Bonifacio *et al.* (2005) quienes reportan un valor promedio de 552 g para 21 colectas de maíz Cacahuacintle. Todas las muestras de maíz Cacahuacintle presentaron valores de PMG inferiores al observado en la muestra de maíz Ancho, que es un maíz también destinado a la elaboración de pozole en algunos estados del país.

El PH presentó un valor promedio de 58.8 kg hL⁻¹ para los Cacahuacintles de Valles Altos de Puebla, 61.0 kg hL⁻¹ para Cacahuacintles del Estado de México y Tlaxcala, 79.1 kg hL⁻¹ para maíz Cónico y 63.8 kg hL⁻¹ para maíz Ancho. En la raza Blando de Sonora que es un maíz de tipo harinoso muy similar al Cacahuacintle, Vázquez *et al.* (2003) reportaron un PH de 65.9 kg hL⁻¹; Bonifacio *et al.* (2005) mencionan un valor promedio de 50.4 kg hL⁻¹ para 21 colectas de maíz Cacahuacintle, ambos valores de PH son similares a los encontrados en las poblaciones de maíz Cacahuacintle del estado de Puebla. El maíz Cónico, con el valor más elevado de PH, no se destina para elaborar pozole, pues requeriría tiempos de cocimiento para reventado muy largos, ya que los gránulos de almidón de la fracción vítrea del endospermo, común en maíces tipo dentado como el Cónico, son difíciles de alcanzar por el agua, por estar rodeados de cuerpos proteínicos (Watson, 2003). El maíz Ancho, aunque con un PH ligeramente mayor que la media en los diferentes grupos de Cacahuacintles, es de endospermo completamente harinoso, lo cual permite que se destine también para elaborar pozole.

El PH es una medida indirecta de la dureza del grano de maíz, valores elevados (80 kg hL⁻¹) son comunes en maíces de endospermo duro (Salinas *et al.*, 1992), en tanto que valores bajos son

característicos en maíces suaves y muy suaves. El maíz Cónico fue el de mayor PH, lo que denota el carácter cristalino de su endospermo.

La variable color de grano presentó un valor promedio de 83.2 y 81.1% de reflectancia para las poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla y del Estado de México y Tlaxcala respectivamente. Para el maíz Cónico y Ancho los valores fueron de 87.5 y 72 % de reflectancia respectivamente. Bonifacio *et al.* (2005) mencionan un valor promedio de 83.4% de reflectancia, valor que coincide con el encontrado en este estudio. Los valores altos de reflectancia indican mayor blancura del grano, lo cual es una característica favorable en el maíz destinado a utilizarse en la elaboración de pozole (Bonifacio *et al.*, 2005).

Considerando principalmente la forma de grano redondeada globosa que Bonifacio *et al.* (2005) reportaron como una característica básica en la calidad pozolera de maíz Cacahuacintle, se seleccionaron 12 poblaciones de este tipo de maíz, una de maíz Ancho y una de maíz Cónico para las pruebas posteriores (Cuadro 2.1).

2.5.2 Variables tecnológicas

Las variables tecnológicas definidas como tiempo de cocción para reventado de grano (TCpRG) y porcentaje de granos reventados (PGR) presentaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.05$). El TCpRG tuvo una variación de 146 a 221 min en los materiales de maíz Cacahuacintle, en el maíz Ancho y Cónico el valor promedio fue de 192 y 196 min respectivamente (Cuadro 2.2). Los valores de TCpRG para los maíces Cacahuacintles aquí encontrados se encuentran dentro de los rangos reportados por Bonifacio *et al.* (2005). El menor TCpRG fue para las poblaciones CPue-00472, CPue-00476 y CPue-00477 con valores de 146-

149 min y forma de grano del tipo redondeado globoso lo cual, de acuerdo con Bonifacio *et al.* (2005), es una característica favorable ligada con menor tiempo de cocimiento.

Cuadro 2.2 Variables tecnológicas para elaboración de pozole en 12 poblaciones de maíz Cacahuacintle y dos testigos.

Genealogía	TCpRGr[†] (min)	PGR^{††} (%)	Vex[¶] (cm³)	PS^{¶¶} (%)	VCC^ξ
CPue-00470	162.5cd	67.8ef	112.0a	2.45a	1.029ab
CPue-00471	164.7cd	56.3f	106.0a	2.34a	1.005ab
CPue-00472	146.0d	73.6cde	114.0a	2.41a	1.014ab
CPue-00473	163.5cd	83.5abc	113.0a	2.28a	1.031ab
CPue-00474	167.9cd	80.4abcd	105.0a	2.62a	1.029ab
CPue-00475	158.8cd	75.7bcde	98.0a	2.82a	1.024ab
CPue-00476	148.7d	88.7a	121.0a	2.39a	1.032ab
CPue-00477	149.4d	77.9abcde	108.5a	2.49a	1.019ab
CPue-00482	157.0cd	71.4de	112.0a	2.81a	1.053ab
CPue-00487	173.2bc	87.5a	102.5a	-	1.027ab
CPue-00488	154.8cd	67.0ef	107.5a	2.40a	1.017ab
T1-Cónico	195.8b	85.6ab	114.0a	3.04a	1.029ab
T2-Maíz Ancho	192.2b	70.7de	116.0a	3.04a	1.077a
P2	220.9a	71.6de	114.0a	3.07a	1.036ab
DSH (0.05)	23.1	11.7	25.6	0.84	0.07

Medias con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

[†] Tiempo de cocción para reventado de grano ^{††} Porcentaje de granos reventados [¶]Volumen de expansión ^{¶¶} Pérdida de sólidos ^ξ Viscosidad del caldo de cocción.

El PGR fluctuó entre 56.3 y 88.7% y no mostró correspondencia con el TCpRG, a diferencia de lo encontrado por Bonifacio *et al.* (2005), quienes mencionan que un elevado tiempo de cocción para reventado contribuyó a que un mayor número de granos reventaran, dichas

diferencias entre ambos estudios se puede atribuir a que la variable PGR se determina con base a una apreciación subjetiva de lo que se considera un grano “floreado” y que puede variar según el operario.

El volumen final de los granos reventados no presentó diferencias significativas entre variedades ($P>0.05$); sin embargo, el maíz Ancho y el Cónico exhibieron los mayores cambios entre el volumen inicial y el final, con un incremento de 63 y 64 cm^3 , respectivamente. La población CPue-00482 de maíz Cacahuacintle fue la que presentó el mayor incremento entre volumen inicial y volumen final (59 cm^3). Bonifacio *et al.*, (2005) mencionan que los factores que determinan la capacidad de expansión de los granos del maíz Cacahuacintle son diferentes a los del maíz palomero, ya que en este último las características del pericarpio son determinantes para el volumen de expansión, en tanto que el Cacahuacintle cuando se somete a cocción ya no posee pericarpio, sólo la capa de aleurona, y posiblemente esta estructura sea la responsable de mantener la presión ejercida por el agua dentro del grano.

En cuanto a la pérdida de sólidos y viscosidad del caldo de cocción, se presentó una correlación positiva ($R=0.61$; $P\leq 0.05$) entre ambas variables, así como, entre PS y TCpFG ($R=0.77$; $P\leq 0.01$). Lo anterior implica que una mayor pérdida de sólidos está asociada con una mayor viscosidad del caldo de cocción, de igual manera, una mayor PS estaría asociada con mayor TCpFG. Los materiales con mayor PS fueron el maíz Ancho, Cónico y P2; dichos materiales proporcionarían un pozole con un caldo más viscoso (Cuadro 2.2). De manera general la pérdida de sólidos fluctuó entre 2.3 y 3.0%. Bonifacio *et al.* (2005) mencionan valores de PS para maíz Cacahuacintle despuntado del orden de 2.25 a 3.67%, los cuales son similares a los reportados en el presente trabajo.

2.5.3 Variables químicas

El contenido de amilosa presentó diferencias significativas entre genotipos ($P \leq 0.05$). El endospermo del grano de las poblaciones de maíz Cacahuacintle de Puebla mostró un contenido de amilosa de 18.9 a 25.3%; los maíces Cónico y Ancho tuvieron valores de 18.4 y 23.4 %, en ese orden (Cuadro 2.3). Los valores obtenidos son similares a lo informado por Hernández (Com. pers.)⁵ para grano entero de maíz Cacahuacintle (23.7%). El almidón es el principal componente del grano de maíz, y se haya integrado por dos polímeros de α D-glucosa que son la amilosa y la amilopectina que poseen diferente capacidad de hidratación, la amilopectina se hidrata más fácilmente que la amilosa (Ansari *et al.*, 2010), de manera que se esperaría que aquellas poblaciones con menor contenido de amilosa, y por tanto mayor de amilopectina, tuvieran menor TCpRG; sin embargo, la correlación entre ambas variables no fue significativa ni mostró la relación que se esperaba (datos no mostrados). Esto posiblemente se deba a que los valores de amilosa obtenidos provienen del endospermo, y al expresarlos en función del contenido de almidón en la muestra total podrían cambiar. La fracción harinosa del endospermo del grano de maíz presenta contenidos de almidón de 90-92 %, que son mayores que los de la parte vítrea (Dombrink-Kurtzman y Knutson, 1997). El maíz Cacahuacintle es completamente harinoso, de manera que se esperarían valores elevados de almidón, pero que pudieran ser diferentes entre las muestras e impactar los contenidos de amilosa. En el almidón de maíces de grano pigmentado, que comúnmente son harinosos, Agama-Acevedo *et al.* (2005) informan contenidos de amilosa de 20-22%, en tanto que en el almidón de maíz blanco tipo dentado encontraron 27%.

⁵ **Hernández C J M (1986)** Estudio de caracteres químicos del grano de las razas mexicanas de maíz y clasificación racial. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 79 p.

Cuadro 2.3 Contenido de amilosa y valores obtenidos en la determinación de viscosidad en harina de endospermo de 12 poblaciones de maíz Cacahuacintle y una población de la raza Cónico.

Genealogía	TIFP[†] (°C)	VMc^{††} (cP)	Vfe[¶] (cP)	Amilosa (%)
T1-Cónico	61.8	3293	3268	18.6d
CPue-00471	65.0	3369	3854	18.9d
CPue-00473	69.6	3764	3565	20.4cd
CPue-00475	66.2	4217	4197	20.5cd
CPue-00482	63.5	3830	3542	20.7cd
CPue-00476	67.6	3916	3850	21.5bcd
CPue-00474	63.9	3769	3849	21.7bcd
P2	69.2	3968	3554	21.7bcd
CPue-00477	63.4	3584	3889	21.9bcd
CPue-00472	65.2	4148	4105	22.4abc
CPue-00470	-	-	-	23.2abc
T2-Maíz Ancho	70.5	1699	2691	23.4abc
CPue-00487	74.2	3719	3248	24.1ab
CPue-00488	71.0	3517	3104	25.3a
DSH (0.05)				3.3

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

[†] Temperatura de inicio de formación de pasta ^{††} Viscosidad máxima al final del ciclo de calentamiento [¶] Viscosidad final del ciclo de enfriamiento.

Con respecto a propiedades de formación de pasta, la amplitud de valores para la variable TIFP fluctuó de 61.8 a 74.2 °C (Cuadro 2.3), las dos poblaciones con mayor contenido de amilosa (CPue-00488 y CPue-00487) mostraron los mayores TIFP; sin embargo, estas variables no presentaron una correlación significativa. Sang *et al.* (2008) en almidones de sorgo waxy,

heterowaxy y normal, encontraron que la TIFP es menor en los materiales con menor contenido de amilosa.

La VMc al final del ciclo de calentamiento presentó diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) entre variedades. La amplitud de variabilidad fue de 3293 a 4217 cP (Cuadro 2.3). En esta variable se observó una caída importante durante el periodo de temperatura constante, atribuido a que algunos de los gránulos hinchados no fueron capaces de mantener su estructura y se solubilizaron durante la agitación, disminuyendo la viscosidad del gel.

La VFe durante el ciclo de enfriamiento fue mayor a la VMc en las poblaciones CPue-00471, CPue-00474 y CPue-00477 (Cuadro 2.3), materiales que en su mayoría presentaron contenidos de amilosa bajos. No se encontró correlación entre las variables VFe y contenido de amilosa. A pesar de que no se observó una alta significancia en las correlaciones entre las variables que determinan las propiedades de formación de pasta y el contenido de amilosa, al graficar los valores obtenidos del RVA (Rapid ViscoAnalyzer) para cuatro materiales con contenidos altos y bajos de amilosa, además de los testigos Cónico y Ancho, se apreció que las poblaciones con alto contenido de amilosa requirieron mayor tiempo para iniciar la formación de pasta (Figura 2.1), y tuvieron una VFe menor que los materiales con contenidos de amilosa bajo. El maíz Cónico mostró un comportamiento parecido al de los maíces Cacahuacintles, en tanto que el del maíz Ancho fue completamente diferente, con un pobre desarrollo de viscosidad, y sin cambios abruptos de ésta durante el ciclo de temperatura constante.

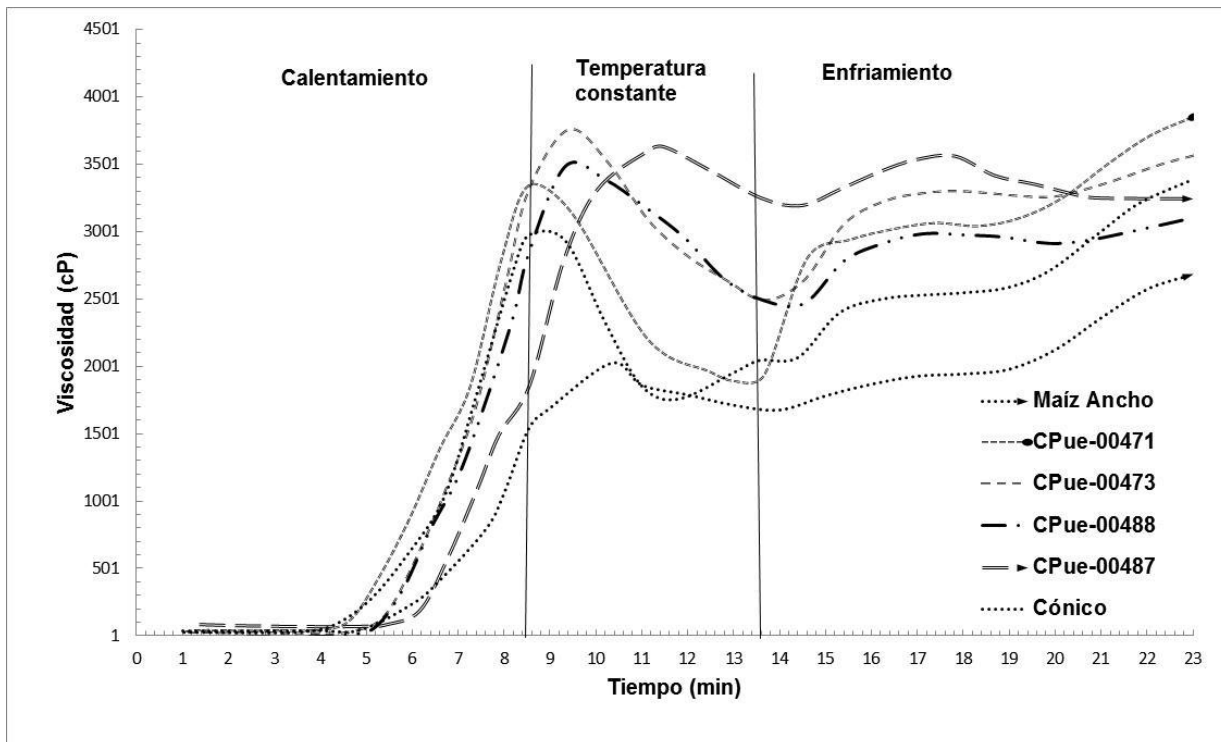


Figura 2.1 Viscosidad de harinas de endospermo de maíz Cacahuacintle con contenido bajo (CPue-00471 y CPue-00473) y alto de amilosa (CPue-00488 y CPue-00487) y los maíces Cónico y Ancho.

2.6 CONCLUSIONES

Se encontró una alta variación genética expresada por las diferencias altamente significativas que mostraron siete de nueve variables sometidas a análisis estadístico.

Considerando la forma de grano (redondeada globosa), el tiempo de cocción para reventado de grano y la viscosidad del caldo de cocción como algunas de las principales características que determinan la calidad pozolera de maíz Cacahuacintle se identificaron las poblaciones CPue-00472, CPue-00476 y CPue-00477 como las más sobresalientes, con potencial para ser incorporadas en programas de mejoramiento genético.

2.7 LITERATURA CITADA

- AACC (American Association of Cereals Chemists) (1976)** Approved Methods of the AACC. The Association. St. Paul, Minnesota. USA.
- Agama-Acevedo E, M A Ottenhof, I A Farhat, O Paredes-López, J Ortíz -Cereceres, L A Bello-Pérez (2005)** Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *Agrociencia* 39: 419-429.
- Ansari O, M Båga, R N Chibbar, N Sultana, N K Howes (2010)** Analysis of starch swelling power in Australian breeding lines of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) *Field Crops Research* 115: 171-178.
- Bonifacio V E I, Y Salinas M, A Ramos R, A Carrillo O (2005)** Calidad pozolera en colectas de maíz Cacahuacintle. *Revista Fitotecnia Mexicana* 28: 253-260.
- Coutiño E B, G Vázquez C, B Torres M, Y Salinas M (2008)** Calidad de grano, tortillas y botanas de dos variedades de maíz de la raza Comiteco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 9-14.
- Dombrink-Kurtzman M A, C A Knutson (1997)** A study of maize endosperm hardness in relation to amylose content and susceptibility to damage. *Cereal Chemistry* 74: 776-780.
- González H A, J Sahagún C, D de J Pérez L, A Domínguez L, R Serrato C, V Landeros F, E Dorantes C (2006)** Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 255-261.
- Hoover R, W S Ratnayake (2002)** Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. *Food Chemistry* 78: 489-498.
- Mauricio S R A, J D Figueroa C, S Taba, M L Reyes V, F Rincón S, A Mendoza G (2004)** Caracterización de accesiones de maíz por calidad de grano y tortilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27: 213-222.
- Paliwal R L (2001)** Usos del maíz. *In: El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*. R L Paliwal, G Granados, H R Laffite, A D Violic, J P Marathée (eds). FAO, Roma. pp: 45-56.

- Salinas M Y, J L Arellano V, F Martínez B (1992)** Propiedades físicas, químicas y correlaciones de maíces híbridos precoces para valles altos. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 42: 161-167.
- Sang Y, S Bean, P A Seib, J Pedersen, Y C Shi (2008)** Structure and functional properties of sorghum starches differing in amylose content. Journal of Agricultural and Food Chemistry 56: 6680-6685.
- SAS Institute (1999)** The SAS[®] System for Windows[®] (Ver. 8.0). SAS Institute Inc. Cary. NC.
- SIAP (2009)** Anuario Agropecuario, 1980-2008. SAGARPA. México, D. F. Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=287&Itemid=430 (Fecha de consulta: 03 de julio de 2010).
- Utrilla-Coello R G, E Agama-Acevedo, A P Barba de la Rosa, S L Rodríguez-Ambriz, L A Bello-Pérez (2010)** Physicochemical and enzyme characterization of small and large starch granules isolated from two maize cultivars. Cereal Chemistry 87: 50–56.
- Vázquez C M G, L Guzmán B, J L Andrés G, F Márquez S, J Castillo M (2003)** Calidad de grano y tortillas de maíces criollos y sus retrocruzas. Revista Fitotecnia Mexicana 26: 231-238.
- Watson S A (2003)** Description, development, structure and composition of the corn kernel. *In*: Corn: Chemistry and Technology. P J White, L A Johnson (eds.). Second ed. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Minnesota, USA. pp: 69-106.
- Wellhausen E J, L M Roberts, E Hernández X, en colaboración con P C Mangelsdorf (1951)** Razas de maíz en México: su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaria de Agricultura y Ganadería. México, D. F. 237 p.

CAPITULO III

CONCLUSIONES GENERALES

Las poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla, en comparación con poblaciones de la misma raza cultivadas en otras regiones del país mostraron características distintivas que los ubicaron como un grupo consolidado, tanto en los análisis morfológicos como en los bioquímicos.

La mayoría de características morfológicas de caracteres agronómicos de las poblaciones de maíz Cacahuacintle de los Valles Altos de Puebla mostraron diferencias estadísticas altamente significativas, lo cual denota alta variación genética.

A nivel intrapoblacional, el grupo de poblaciones nativas de Valles Altos de Puebla mostró la existencia de diversidad genética con base en marcadores bioquímicos con respecto al número de alelos encontrados (42), el porcentaje de polimorfismo (72%), número de alelos raros (12%) y valores de G_{ST} (0.14).

Considerando la forma de grano (redondeada globosa), el tiempo de cocción para reventado de grano y la viscosidad del caldo de cocción como algunas de las principales características que determinan la calidad pozolera de maíz Cacahuacintle se identificaron las poblaciones CPue-00472, CPue-00476 y CPue-00477 como las más sobresalientes.

Lo anterior justifica la planeación y ejecución de un programa de fitomejoramiento orientado a mejorar características agronómicas y de aptitud de uso en las poblaciones criollas de esta raza, en los Valles Altos del Estado de Puebla.