



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA**

**RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS
AGRONÓMICAS DE CRUZAS
INTERRACIALES DE MAÍZ ADAPTADO A
VALLES ALTOS**

ANGELA MANUELA VELASCO GARCÍA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe ANGELA MANUELA VELASCO GARCÍA, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DR. J. JESÚS GARCÍA ZAVALA, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE CRUZAS INTERRACIALES DE MAÍZ ADAPTADO A VALLES ALTOS y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 01 de julio de 2018



Firma del
Alumno (a)



Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: "**RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE CRUZAS INTERRACIALES DE MAÍZ ADAPTADO A VALLES ALTOS**" realizada por la alumna: **ANGELA MANUELA VELASCO GARCÍA** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. J. JESÚS GARCÍA ZAVALA

ASESOR



Dr. RICARDO LOBATO ORTIZ

ASESOR



Dr. JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2018

RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE CRUZAS INTERRACIALES
DE MAÍZ ADAPTADO A VALLES ALTOS
ANGELA MANUELA VELASCO GARCÍA, M. en C.
COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2018

RESUMEN

El germoplasma exótico de maíz (*Zea mays* L.) es una fuente de alelos favorables para el mejoramiento genético, pero antes de ser empleado debe ser adaptado a las condiciones ambientales de interés. El objetivo de la investigación fue evaluar agronómicamente poblaciones de maíz exótico adaptado a Valles Altos y sus respectivas cruzas interraciales. Para lo anterior, se realizaron dos estudios. El primero consistió en evaluar nueve poblaciones adaptadas de maíz exótico adaptado a Valles Altos, ocho de sus cruzas simples, una craza triple, generaciones avanzadas de las cruzas y cuatro testigos. Se registró el rendimiento y seis de sus componentes. Se tuvo significancia ($P \leq 0.01$) entre genotipos para todos los caracteres; los materiales exóticos rindieron de 3.89 a 11.17 t ha⁻¹ y los testigos de 8.06 a 11.56 t ha⁻¹. El rendimiento de los testigos y del Tuxpeño se correlacionó con longitud y diámetro de mazorca y número de granos por hilera. La heterosis promedio para rendimiento y sus componentes fluctuó de -5.30 a 6.53 %; fue positiva para rendimiento (5.68 %) con valores individuales de 4.3 a 26.19 %, por lo que el rendimiento de las cruzas aumentó. La segunda investigación consistió en evaluar los genotipos antes mencionados y nueve poblaciones originales. Para lo anterior, se registraron 28 caracteres cualitativos y cuantitativos. Mediante análisis de componentes principales y agrupamiento jerárquico, se identificaron seis grupos con base en caracteres de rendimiento, precocidad, estructura morfológica y características de mazorca. Las poblaciones originales mostraron poca adaptación a Valles Altos al incrementar su altura, días a floración y disminuir su rendimiento; sin embargo, la metodología de selección empleada permitió obtener poblaciones con mejores características de rendimiento de mazorca, menos días a floración, menor altura de planta, menor número de ramas primarias de espiga y mazorcas de forma cónica. Con ambos estudios, se concluyó que el germoplasma exótico y sus cruzas presentaron características de interés, por esto podrían ser empleadas *per se* o como progenitores para el mejoramiento genético del maíz para Valles Altos.

Palabras clave: *Zea Mays* L. adaptación, cambios adaptativos, poblaciones exóticas, rendimiento, selección, variabilidad.

YIELD AND AGRONOMIC CHARACTERISTICS OF INTERRACIAL MAIZE CROSSES
ADAPTED TO HIGH VALLEYS

ANGELA MANUELA VELASCO GARCÍA, M. en C.
COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2018

ABSTRACT

Exotic maize germplasm (*Zea mays* L.) is a source of novel alleles for genetic improvement, but before being used exotic germplasm must be adapted to the environmental conditions of interest. The objective of this study was to evaluate agronomically populations of exotic maize adapted to High Valleys and their respective interracial crosses. For that reason, we carried out two studies. The first one was to evaluate nine adapted populations of exotic maize, eight of its single crosses, a triple cross, advanced generations of the crosses and four controles. Grain yield and six of its components were recorded. Statistical significance ($P \leq 0.01$) among genotypes were found for all traits; the exotic materials yielded from 3.89 to 11.17 t ha⁻¹ and the controles from 8.06 to 11.56 t ha⁻¹. Grain yield of the controles and Tuxpeño were correlated with length and diameter of ear and number of grains per row. The average heterosis for yield and its components fluctuated from -5.30 to 6.53 %, and it was positive for yield (5.68 %) with individual values from 4.3 to 26.2 %, so that the yield of the crosses increased. In the second work we evaluated the same genotypes previously mentioned and nine original populations. For these, 28 quantitative and qualitative characters were recorded. Analysis of principal components and hierarchical clustering identified six groups based on yield performance, earliness, morphological structure and ear characteristics. The original populations showed little adaptation to High Valleys as they increased its plant height, days to flowering and decreased its yield. However, recurrent selection allowed to obtain populations with better yield components, fewer days to flowering, lower plant height, fewer tassel primary stem branches and cone-shaped ears. In both studies, it was concluded that exotic germplasm and their crosses showed characteristics of interest because these could be employed as varieties *per se* or as parents for genetic improvement of the local maize from High Valleys.

Key words: *Zea Mays* L. adaptation, adaptive changes, yield, exotic populations, selection, variability

DEDICATORIA

A Dios

Por permitirme lograr este gran paso en mi vida profesional

*A mi esposo Iván Maryn,
Por su apoyo, amor, respeto, comprensión,
aventuras, cariño...*

A mis padres Luisa y Tereso[†]

Por su inmenso amor que me brindan y ser los motores de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo Mexicano, que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), me financió económicamente mis estudios de Postgrado.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo: Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-**Genética**, y al Personal Académico de este Postgrado, que ayudó a mi formación profesional.

Al Dr. J. Jesús García Zavala, por brindarme la confianza y apoyo en todo momento para realizar este trabajo, pero sobre todo, por su enseñanza, orientación, motivación, amistad y dirección en mi formación académica y personal.

Al Dr. Ricardo Lobato Ortiz, por su amistad, apoyo y orientaciones brindadas durante mi estancia en Genética.

Al Dr. Jaime Sahagún Castellanos, por su amistad, apoyo en este proceso y valiosas sugerencias durante la realización de esta investigación.

Al Dr. Serafín Cruz Izquierdo, por el apoyo brindado en el proceso de titulación.

Al M.C. Carlos Sánchez Abarca, por el apoyo y facilidades brindadas para desarrollar este proyecto.

A Iván Maryn Marín Montes, por el apoyo brindado en todo momento para realizar este proyecto.

Al equipo de trabajo del Programa de Genética y Mejoramiento Genético de Maíz en la Mesa Central del Postgrado de Recursos genéticos y Productividad- Genética, quienes me apoyaron activamente para la realización de este trabajo.

A mis hermanos: Ruben, Heriberto, Javier, Jorge, José, Edgar, Antonio, Luz y Ana; por su apoyo incondicional, compañerismo y cariño en todo momento.

A Patricia Campos, por su amistad y apoyo durante mi estancia en Genética.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
HIPÓTESIS	3
MARCO CONCEPTUAL.....	4
Importancia agrícola del Maíz.....	4
Biodiversidad	4
Mejoramiento genético.....	5
Origen y diversificación del maíz.	8
Características fenotípicas de las razas en su nicho ecológico.....	9
LITERATURA CITADA.....	12
CAPÍTULO I. RENDIMIENTO, COMPONENTES DE RENDIMIENTO Y HETEROSIS DE GERMOPLASMA EXÓTICO DE MAÍZ ADAPTADO A VALLES ALTOS	15
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Material Vegetal	18
Ubicación	19
Manejo agronómico.....	19
Diseño experimental.....	19
Caracteres evaluados	19
Análisis estadístico.....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
Análisis de Varianza.....	20
Comparación de medias	22

Heterosis.....	24
Correlación	26
CONCLUSIONES	27
LITERATURA CITADA.....	28
ANEXO.....	33
CAPÍTULO II: VARIABILIDAD MORFOLÓGICA Y CAMBIOS ADAPTATIVOS EN MAÍZ EXÓTICO SELECCIONADO EN VALLES ALTOS	38
RESUMEN.....	38
ABSTRACT	39
INTRODUCCIÓN	40
MATERIALES Y MÉTODOS	41
Material Vegetal.....	41
Ubicación	42
Manejo agronómico.....	42
Caracteres evaluados.....	42
Análisis estadístico.....	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
Componentes principales	44
Análisis de agrupamiento	46
Evaluación visual de aspecto de planta y mazorca	51
CONCLUSIONES	52
LITERATURA CITADA.....	53
ANEXO.....	57
CONCLUSIONES GENERALES	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Análisis de varianza combinado del rendimiento y componentes de rendimiento de poblaciones y cruzas interraciales de maíz tropical adaptado a Valles Altos.....	21
Cuadro 1.2 Comparación de medias (análisis combinado) del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales adaptadas a Valles Altos.....	23
Cuadro 1.3 Heterosis respecto al progenitor medio (%) de 11 cruzas de maíz tropical y subtropical para tres ambientes de evaluación.....	26
Cuadro 1.4 Correlaciones entre el carácter de rendimiento y de sus componentes para poblaciones y sus cruzas interraciales de maíz adaptadas a Valles Altos.	27
Cuadro 2.1. Comparación de medias de diez los caracteres de mayor varianza explicativa entre seis grupos de germoplasma exótico evaluado en Valles Altos.	48
Anexo 1.1. Nomenclatura de los genotipos adaptados por selección a Valles Altos.....	33
Anexo 1.2. Origen geográfico del germoplasma exótico adaptado por selección a Valles Altos.....	34
Anexo 1.3 Comparación de medias del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales en un ambiente de evaluación (lote C-8).....	35
Anexo 1.4 Comparación de medias del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales en un segundo ambiente de evaluación (lote C-13).....	36
Anexo 1.5 Comparación de medias del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales en un tercer ambiente de evaluación “San Martín, Chapingo”.	37
Anexo 2.1 Correlación fenotípica de los caracteres evaluados de germoplasma exótico evaluado en Valles Altos.....	57
Anexo 2.2 Valores propios y varianza absoluta y acumulada de los componentes principales obtenidos.....	58
Anexo 2.3 Vectores propios para los tres componentes principales de mayor varianza explicativa para las 15 variables evaluadas.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Distribución de los genotipos con base en tres componentes principales.	45
Figura 2.2 Dendrograma jerárquico obtenido mediante distancias Euclidianas de diez caracteres morfológicos de mayor correlación en el análisis de componentes principales.	47

INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz (*Zea mays* L.) en México se cultiva principalmente en dos sistemas de producción, el de riego y el de temporal. El cultivo de temporal es el de mayor superficie sembrada en México, y presenta un crecimiento de tasa media anual de 3.7 %, mientras que la producción bajo riego solo ha crecido 1.2 % (FIRA, 2015), por lo que actualmente se acentúa la producción en condiciones restrictivas de humedad.

Durante el año 2015, el rendimiento promedio de maíz en riego se ubicó en 8.0 t ha⁻¹, mientras que en temporal fue de 2.3 t ha⁻¹ (FIRA, 2016). En los valles altos de México, el bajo rendimiento en temporal se debe principalmente a que los productores utilizan genotipos de maíz adaptados localmente que presentan bajos rendimientos (2.79 t ha⁻¹) (SIAP, 2017). Al respecto, una alternativa para mejorar el rendimiento del maíz en México es la ampliación de la base genética de las variedades locales, y esto se puede lograr mediante la introducción de germoplasma exótico y la aplicación de las diferentes metodologías del mejoramiento genético del maíz que permitirían su adaptación. Con ello se podrían generar variedades nuevas e incorporar alelos favorables para enriquecer la expresión fenotípica de las variedades locales.

El mejoramiento genético se considera como el arte y la ciencia que permite el desarrollo de cultivares superiores (Hallauer *et al.*, 2010). Esto consiste en generar genotipos idóneos que se adapten a diferentes ambientes y que permitan satisfacer las necesidades de la sociedad y de los productores.

El maíz es un cultivo con gran variabilidad genética susceptible de ser aprovechada. Existen 59 razas y más de 100 sub razas distribuidas en todo el territorio mexicano (Wellhausen *et al.*, 1951; Kato *et al.*, 2009). Sin embargo, el mejoramiento genético del maíz en México y en otras partes solo emplea una cantidad mínima de la diversidad existente (Goodman, 1999). En el caso de Valles Altos, el mejoramiento genético del maíz se ha enfocado principalmente en el uso de las razas Chalqueño y Cónico (Pérez, 2002). Es por esto que una alternativa para ampliar la base genética de las variedades locales de maíz es la introducción de razas de maíz exótico (Goodman, 1965).

El uso de las razas exóticas es una buena opción para aumentar la variabilidad del maíz local, ya que contienen una base genética diferente que puede ser utilizada en diferentes programas de mejoramiento genético del maíz (Hallauer *et al.*, 2010). Se ha demostrado que al emplear la selección fenotípica para adaptación de maíz exótico, es posible transferir y aprovechar los nuevos

alelos de estos materiales en variedades, líneas e híbridos generados a partir de material exótico adaptado (Albrecht y Dudley, 1987), pero también podrían emplearse *per se* las variedades exóticas adaptadas, lo que también incrementa la diversidad del maíz local.

Por lo anterior, para mejorar la producción de maíz en Valles Altos y aumentar la diversidad del maíz local, es de gran importancia introducir, adaptar y evaluar materiales exóticos para conocer su potencial genético y poder emplearlos *per se* y en la formación de variedades e híbridos para las condiciones de Valles Altos; así, se podría incrementar tanto el rendimiento como mejorar las características fenotípicas de los materiales que se emplean en los Valles Altos de México.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

México es centro de origen del maíz y tiene una gran diversidad de culturas y de ambientes. Estos han hecho posible la generación de tipos específicos de maíz, que contribuyen a la gran diversidad y variación de esta especie. Es por esto que en cada región agrícola se emplean razas localmente adaptadas a las condiciones particulares del ambiente y de manejo de acuerdo con el sistema de producción empleado, conducente a satisfacer requerimientos antropocéntricos de uso del grano y de la planta. Bajo estas condiciones de cultivo, los híbridos comerciales de maíz no son una opción viable para la agricultura tradicional de México, ya que presentan uniformidad y poca adaptación a las condiciones de las diferentes zonas de producción (Vidal *et al.*, 2008), por lo que generan rendimientos de grano bajos. Entonces, se hace necesario generar variedades mejoradas de buen rendimiento y calidad con amplia adaptación y aceptación por parte de productores y consumidores, y que sirvan de base para la formación de híbridos estables con usos especiales.

Dos alternativas para incrementar la producción en las diferentes regiones agrícolas de México son generar variedades nuevas en la zona y mejorar directamente las variedades localmente adaptadas, con la ampliación de su variabilidad genética, vía la introducción y selección para adaptación de germoplasma exótico (Goodman, 1965). Con esto se pueden generar variedades exóticas adaptadas nuevas en la región que podrían ser usadas como variedades mejoradas *per se*, como fuentes de líneas para formar híbridos interraciales, o como donantes de alelos favorables nuevos al germoplasma local. Con respecto a la hibridación, el aprovechamiento agronómico de la generación filial F1 de cruas interraciales se basa en que estos híbridos presentan en general heterosis alta para muchas características, debido a que en ellos se explotan los efectos genéticos favorables de alelos nuevos para caracteres específicos, como rendimiento, tolerancia a factores

abióticos y bióticos adversos. Este aprovechamiento permitiría mitigar muchos de los problemas que afectan la producción nacional de maíz.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar agronómicamente poblaciones progenitoras de maíz exótico adaptado a Valles Altos y sus respectivas cruzas interraciales.

Objetivos específicos

- Evaluar cambios morfológicos adaptativos de poblaciones de maíz exótico adaptado a Valles Altos del centro de México.
- Evaluar el rendimiento y sus componentes de cruzas interraciales de maíz y
- Evaluar heterosis de cruzas interraciales de maíz exótico adaptado a Valles Altos.

HIPÓTESIS

La selección para adaptación de maíz exótico a Valles Altos favoreció el rendimiento de los compuestos avanzados de selección de las poblaciones exóticas y además propició cambios morfológicos adaptativos. También se espera que las cruzas interraciales expresen heterosis en rendimiento y sus componentes e igualen el rendimiento de las variedades locales de Valles Altos.

MARCO CONCEPTUAL

Importancia agrícola del Maíz

Importancia Mundial

El maíz es el principal componente en la dieta alimenticia de muchos millones de seres humanos, es también alimento en la producción pecuaria, y materia prima muy importante para la industria en general. En el 2016, se tuvo una producción mundial de grano de maíz de 1, 060, 107, 470 toneladas, superando a la del trigo y del arroz. En este contexto, América fue el primer continente productor con 547, 416, 865 ton, seguido de Asia con 324, 087, 900 ton y en tercer lugar Europa con 117, 413, 713 ton (FOASTAT, 2018). En 2016, los Estados Unidos de América fue el país con mayor producción de Maíz (384, 777, 890 ton), le siguió China con 231, 673, 946 ton y Brasil fue el tercer país productor con 64, 143,414; México en la esfera mundial se colocó en el quinto lugar con 28, 250, 783 ton (FOASTAT, 2018).

Importancia nacional

El maíz es el cultivo más importante en México porque constituye el componente principal de la dieta alimenticia de la población mexicana (García *et al.*, 2002). En el año 2017 el maíz presentó una superficie sembrada para grano de 7, 550, 669 hectáreas, con una producción de 27, 762, 480.90 toneladas (SIAP, 2017). Las cinco principales entidades productoras fueron: Sinaloa (6,167,095.85 ton), Jalisco (4,024,863.86ton), Estado de México (2,219,616.11 ton), Michoacán (1,911,238.75 ton) y Guanajuato (1,642,835.37 ton) (SIAP, 2017).

Hasta el año agrícola 2015 la producción de maíz para grano en México creció a una tasa anual de 6.1 % (24.69 millones de toneladas), siendo el 85.9 % de la producción nacional correspondiente a maíz blanco, 13.6 % a maíz amarillo y el restante 0.5 % a otros tipos de maíz (FIRA, 2016).

Aunque México es uno de los países con mayor superficie sembrada de maíz, aún no se logra abastecer la demanda nacional de este cereal. Cada año México importa maíz de otros países para satisfacer las necesidades de la industria y la alimentación pecuaria. Tan sólo en 2015, se importaron 12.35 millones de toneladas, de las cuales 11 millones de toneladas provinieron de los Estados Unidos de América (FIRA, 2016).

Biodiversidad

México es centro de origen y diversificación del maíz, por esto posee diversidad genética amplia en esta especie, la cual está adaptada a diversos nichos ecológicos en los que se emplean variedades locales productivas en ciertas condiciones ambientales (Nava *et al.*, 2000). Esta diversidad

constituye un amplio reservorio de alelos que deben ser conservados, estudiados e identificados para aprovecharlos en el mejoramiento genético de la especie. Al respecto, las 59 razas y las más de 100 sub razas distribuidas en todo el territorio mexicano son el principal reservorio de alelos de maíz (Wellhausen *et al.*, 1951; Kato *et al.*, 2009). Una raza se define como “un grupo de individuos emparentados con suficientes características en común para permitir su reconocimiento como grupo”, de manera que desde el punto de vista genético una raza es un grupo de individuos con un número significativo de genes en común (Anderson y Cutler, 1942).

Mejoramiento genético

El mejoramiento genético es el arte y la ciencia que permite el desarrollo de cultivares superiores (Hallauer *et al.*, 2010). Esto consiste en generar genotipos idóneos que se adapten a diferentes ambientes y que cumplan con las necesidades de la sociedad y de los productores. Al respecto, en general, el mejoramiento genético del maíz solo emplea una parte mínima de todo el germoplasma disponible, porque las líneas y variedades actuales se derivaron de entrecruzamientos de materiales élites ya existentes (Goodman, 1999). Por esto, la introducción de germoplasma de maíz exótico es importante para incrementar la variabilidad genética en el material élite, incrementar la heterosis de rendimiento debido a la diversidad genética (Hallauer y Sears, 1972), y aumentar la tolerancia a plagas y enfermedades (Hallauer y Carena, 2009).

Con respecto al aprovechamiento del germoplasma exótico de maíz, se han realizado varios y diferentes estudios de introducción de material genético exótico a diferentes regiones. En este contexto, el germoplasma exótico es el que está disponible en otras regiones y se introduce a una zona determinada (De La Cruz *et al.*, 2003). Por su parte, Hallauer *et al.* (2010) mencionan que el germoplasma exótico no necesariamente debe ser material genético foráneo; en cambio, el germoplasma se considera como exótico cuando no está adaptado al ambiente de los programas de mejoramiento, por lo que de manera inmediata no tiene mucha utilidad.

Emplear material exótico es difícil porque no está adaptado a la región de interés (Gouesnard *et al.*, 1996) y muestra problemas de desadaptación como: susceptibilidad a enfermedades, alteración del ciclo vegetativo, y disminución del rendimiento (Navas y Cervantes, 1992). Así, el uso de germoplasma exótico requiere de una fase previa de adaptación a la región donde será utilizado (Gouesnard *et al.*, 1996).

En China, por ejemplo, se estudió el comportamiento de poblaciones exóticas con el objetivo de identificar materiales sobresalientes para ampliar la variabilidad del germoplasma del maíz local,

para esto emplearon germoplasma de las razas Tuxpeño, Pop28, Pop32, Pop26, Pop445, Pop446, Stay Green-yellow, QPM-Y y Suwan 1, proporcionadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); germoplasma de la Universidad Estatal de Iowa, Estados Unidos; ETO mejorado (BS16), Lancaster (BS26), Tuxpeño mejorado (BS28), Suwan 1 mejorado (BS29), Iodent (BS30), Lancaster (Cpop.11) y Reid Yellow Dent (Cpop.12); y líneas desarrolladas en Sipingtou, China (Csyn 5); y se encontró que los efectos genéticos aditivos fueron más importantes que los efectos genéticos no aditivos en los caracteres evaluados; Pool 26, Pop32, Tuxpeño y Suwan 1 mostraron alelos favorables para tolerancia al acame y potencial de rendimiento, mientras que Pop28 y BS29 presentaron mayor rendimiento para la región norte de China (Yong *et al.*, 2013).

El germoplasma exótico de maíz puede ser adaptado mediante selección masal a diferentes ambientes en solo unos cuantos ciclos de selección, antes de ser cruzado con variedades locales para mejorar características como rendimiento de grano y sus componentes (García *et al.*, 2002; Gómez-Espejo *et al.*, 2015). Lo anterior es debido a que los cultivares tropicales cultivados en ciclos iniciales en ambientes templados se caracterizan por presentar desadaptación, la cual se manifiesta por tener planta muy alta, más hojas, espigas más grandes, ciclo de crecimiento más largo debido al fotoperiodo, ataque de enfermedades, y menor rendimiento de grano (Hallauer y Carena, 2009).

En México, se han realizado diferentes trabajos relacionados con la adaptación de maíz exótico a Valles Altos y otras regiones. Por ejemplo, Pérez-Colmenarez *et al.* (2000) evaluaron 12 ciclos de selección masal visual estratificada en un compuesto intervarietal llamado Tuxpeño Crema 1, en Chapingo y Montecillo, Estado de México, ambas localidades de clima templado. En este estudio encontraron que en los cuatro primeros ciclos de selección se produjo el mayor rendimiento de grano y de sus componentes. Gómez-Espejo *et al.* (2015) evaluaron las razas Tabloncillo, Tepecintle, Comiteco y Chalqueño (testigo) en sus versiones originales y adaptadas a Valles Altos por más de 12 ciclos de selección y 15 cruza entre variedad local original por variedad exótica original y por adaptada, variedad local mejorada por variedad exótica original y por adaptada, y variedad exótica original por su versión adaptada, y encontraron que las poblaciones exóticas adaptadas superaron en rendimiento a sus respectivas versiones originales y también fueron más precoces y más altas. Asimismo, encontraron que la cruza entre las poblaciones Tepecintle original x Tepecintle adaptado presentaron heterosis alta en rendimiento de mazorca con respecto al

progenitor medio (126 %), Comiteco adaptado x Comiteco original (85.9%), Chalqueño original por Tepecintle original (57.8%), Chalqueño mejorado por Tepecintle adaptado (54.3 %) y Chalqueño mejorado x Tepecintle original (52.2 %).

Navas y Cervantes (1992) evaluaron cruzas directas posibles entre líneas tropicales de maíz de México desde F2 hasta F8 en Montecillo, Estado de México; encontraron que la selección de generaciones avanzadas de cruzas interraciales tropicales de maíz exótico fue más efectiva para el rendimiento de grano, hasta 18 % por ciclo. Resultados similares fueron encontrados por Pérez *et al.* (2002) al introducir y adaptar diez razas de maíz (Pepitilla, Tabloncillo, Comiteco, Celaya, Vandeño, Tepecintle, Olotillo, Nal-Tel, Zapalote Chico y Tuxpeño) a Valles Altos, porque el rendimiento de mazorca por planta se incrementó en un 2.6 a 24.7 %; los días a floración masculina disminuyeron de 0.5 a 1.2 % en ocho de las diez razas; la altura de planta en las razas Tepecintle, Nal-Tel y Pepitilla presentaron un incremento significativo en 4.0, 3.1 y 2.1 cm por ciclo, respectivamente, en cambio las razas Tuxpeño, Celaya y Olotillo disminuyeron su altura significativamente en 2.6, 2.0 y 1.9 cm por ciclo de selección, respectivamente.

En este contexto, Ponce (2002) evaluó el comportamiento de las mismas diez razas de maíz de Pérez *et al.* (2002) en su versión original y con nueve ciclos de selección y sus cruzas con variedades de clima templado (Cónico y dos variedades de la raza Chalqueño). Los resultados mostraron superioridad en rendimiento de las variedades adaptadas sobre las originales, de las cuales las poblaciones Pepitilla, Olotillo y Tepecintle presentaron mayor rendimiento por planta (104.3, 85.3 y 82.4 g pl⁻¹, respectivamente). Asimismo, encontró heterosis positiva alta para rendimiento entre la crusa de Olotillo adaptado por el Compuesto Universal (Chalqueño) mejorado (CUSM₁₂) (165%), Tabloncillo x CUSM₁₂ (157.7 %) y Celaya x CUSM₁₂ (157.7 %).

Palemón *et al.* (2012) evaluaron la estabilidad de 25 variedades de maíz durante cinco ciclos agrícolas con el propósito de identificar una crusa intervarietal estable, consistente y con buen potencial de rendimiento para la región semi-cálida de Guerrero México, y encontraron cuatro cruzas intervarietales y dos progenitores masculinos que mostraron estabilidad.

Por otra parte, la Universidad Estatal de Carolina del Norte de Estados Unidos mantiene un programa de mejoramiento de maíz por selección y generación de líneas de maíz exótico de diferentes programas internacionales de mejoramiento, con el objetivo de ampliar la base genética

del maíz vía la incorporación de alelos nuevos al germoplasma americano (Nelson y Goodman, 2008).

Cuando se trabaja con germoplasma de maíz exótico, las poblaciones generadas después de ciertos ciclos de selección pueden ser utilizadas *per se* en la región donde se introdujeron o bien en la formación de híbridos entre exótico x exótico o adaptado local x exótico, y explotar la heterosis. La heterosis es el vigor híbrido que se expresa en la F1 de una cruce de progenitores contrastantes y representa la superioridad del híbrido con respecto a sus progenitores (Hallauer *et al.*, 2010). Moll *et al.* (1965) y De la Cruz *et al.* (2003) mencionan que a mayor divergencia genética entre poblaciones progenitoras se puede obtener mayor heterosis en los caracteres de interés, aunque de acuerdo con Hallauer *et al.* (2010) existe un límite, ya que una divergencia extrema entre los padres genera problemas fisiológicos y de desarrollo en la F1, debido a que, aparentemente, las cruces entre padres extremadamente divergentes crean una situación en la que se interrumpe el funcionamiento armonioso de los alelos. En consecuencia, las funciones fisiológicas no son tan eficientes como en situaciones donde los alelos han tenido presiones de selección similares. Al respecto, Morales *et al.* (2007) evaluaron heterosis entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México; y encontraron que la cruce entre el híbrido comercial adaptado P-3394 con la Pob49 (población adaptada) presentó la mayor heterosis (77%).

Origen y diversificación del maíz.

El maíz fue domesticado por primera vez en el sur de México a partir del teosintle (*Zea mexicana* ssp. *Parviglumis*) desde hace 6000 a 10000 años, mientras que la subespecie ssp. *mexicana* fue un factor importante que contribuyó a la diversificación del maíz (Matsuoka *et al.*, 2002). Después, el maíz se extendió a América del Norte y Sudamérica; durante esta expansión el maíz se adaptó a climas diversos y tipos de suelos diferentes, por esto la morfología de las plantas también se diversificó tremendamente (Vigouroux *et al.*, 2008).

El maíz se clasificó en grupos denominados razas. Los miembros de una raza presentan similitudes en el fenotipo, distribución geográfica, material genético, citología, fisiología y características agronómicas (Wellhausen *et al.*, 1951). Muñoz (2003), por su parte, definió a una raza como un conjunto de poblaciones con cierto grado de semejanza, adaptadas a una región ecológica llamada nicho.

Características fenotípicas de las razas en su nicho ecológico

De acuerdo con Wellhausen *et al.* (1951), las razas evaluadas en este estudio poseen las siguientes características:

Pepitilla: Sus plantas son de altura mediana a alta (2.7 m.), período vegetativo intermedio, número intermedio de hijos, muchas hojas (14.9), índice de venación bajo, sus espigas son largas (38.6 cm) con muchas ramificaciones (21.8) dispuestas a lo largo de más de la tercera parte de longitud del eje central, ramas secundarias frecuentes, terciarias ausentes e índice de condensación mediano.

Las mazorcas son de longitud mediana a larga (12.3 cm), gruesas (5.3 cm de diámetro), ligero adelgazamiento en la punta, uniforme de la base al ápice, número de hileras promedio de 15.5, diámetro del pedúnculo grande, granos muy angostos, delgados y muy largos con 19 a 23 mm de longitud, el ápice del grano termina en pico con 10 mm de longitud que se extiende casi en ángulo recto del eje principal del grano, pericarpio sin color. Su olote presenta un diámetro de 22 a 28 mm. Se adapta a alturas de 1000-1700 msnm.

Tabloncillo: son plantas de 2.4 m de altura, precoces, presentan muchos macollos, tallos delgados, 14.6 hojas, con 8.6 cm de ancho y 79.8 cm de longitud, muy poca pubescencia. Adaptado a altitudes bajas que van desde 0 a 1500 msnm. Sus espigas son largas (40 cm) con pocas ramificaciones dispuestas ampliamente a lo largo del eje central, con un aspecto abierto en la espiga, espigas secundarias frecuentes pero espigas terciarias ausentes. Las mazorcas son de longitud media (16.4 cm), delgadas, cilíndricas con excepción de un ligero adelgazamiento en ambos extremos, 9.1 hileras en promedio, 36 a 44 mm de diámetro de la mazorca, 22 a 25 mm de diámetro del olote, 11 a 13 mm de diámetro del raquis. Los granos son muy anchos, su longitud es de 9 a 12 mm, su cara superior forma una curva plana y con fuerte depresión, estrías bien marcadas.

Comiteco: Plantas muy altas, con frecuencia de 4 a 5 metros en su hábitat nativo, pocos hijuelos, tallos gruesos, 20 hojas anchas por planta, vainas de las hojas ligeramente pubescentes, adaptado a altitudes de 1,100 a 1,500 msnm.

Espigas largas y ramificadas (21 ramas) dispuestas a lo largo de la tercera parte de la longitud del eje principal, espigas secundarias abundantes, sin espigas terciarias, su índice de condensación es bajo. Las mazorcas son largas (28.7 cm) y ligeramente cónicas con 13.5 hileras en promedio, su pericarpio no presenta color. El diámetro de la mazorca va de 50 a 55 mm, con un diámetro del olote de 32 a 37 mm y el diámetro del raquis de 16 a 21 mm.

Celaya: plantas altas de 2 a 3 metros, de ciclo tardío, pocos macollos, 16 hojas con poca pubescencia por planta e índice de venación bajo, adaptado a altitudes desde 1,200 hasta 1800 msnm. Las espigas son largas (42.4 cm), con algunas ramificaciones secundarias y pocas terciarias, con un índice de condensación bajo. Las mazorcas son medianas (17 cm) y cilíndricas, en promedio tienen 12.4 hileras, el diámetro del pedúnculo es mediano, sus granos son delgados, largos y muy dentados. Las mazorcas presentan un diámetro de 43 a 47 mm, diámetro del olote 20 a 27 mm, 12 a 15 mm de diámetro del raquis, 12 a 14 mm de longitud del grano.

Chalqueño: presenta una distribución entre los límites de 1800 a 2300 msnm. Se caracterizan por ser plantas de altura mediana a muy altas de 2 a 5 metros de altura, un periodo vegetativo de 5 a 6 meses, presentan un número reducido de macollos, número reducido de hojas (14.7 hojas), longitud de hoja mediana (84.1 cm), 9.7 cm de ancho de hoja, las espigas presentan una longitud de 43 cm, pocas ramificaciones primarias (10.7 ramas) y con bajo porcentaje de ramas secundarias (10.7) y ausencia de ramas terciarias. Las mazorcas presentan una longitud mediana, con un número de hileras de 16.6, 49 a 52 mm de diámetro de mazorca, diámetro del olote de 28.3 mm, y granos de 7.2 mm de ancho y 15.4 mm de largo.

Vandeño: 2.5 a 3 m de altura, de periodo vegetativo intermedio, con pocos macollos, 13.7 hojas con poca pubescencia e índice de venación medio. Esta raza se adapta a altitudes desde 0 hasta 50 msnm.

Las espigas tienen una longitud de 40.5 cm. Las mazorcas son de 17.2 cm, gruesas (51 a 55 mm), cilíndricas con ligero adelgazamiento hacia el ápice, 13.2 hileras, grano de tamaño mediano, muy dentados, estrías poco profundas, endospermo blanco, pericarpio sin color. El diámetro del olote de 33 mm en promedio; el diámetro del raquis de 17 a 21 mm y la longitud del grano de 13.9 mm.

Tepecintle: plantas con 1.8 m de altura, con un periodo vegetativo intermedio, pocos macollos, 13.6 hojas por planta, índice de venación intermedio, poca pubescencia en la planta, y se adapta a altitudes de 0 a 600 msnm. Las espigas son largas (41.5 cm) con muchas ramificaciones primarias y secundarias, las ramificaciones terciarias son frecuentes, baja condensación. Las mazorcas son cortas (10.4 cm), gruesas (45 a 60 mm), cilíndricas con ligero adelgazamiento cerca del ápice del olote generalmente de 2 a 3 cm, presentan 11.8 hileras en promedio, diámetro del pedúnculo intermedio, granos de tamaño mediano, fuertemente dentados, estrías poco profundas, pericarpio sin color. El diámetro del olote es de 27 a 39 mm, su diámetro del raquis en un rango de 16 a 24 mm y la longitud del grano de 10 a 13 mm.

Tuxpeño: presenta plantas altas de 3 a 4 metros de altura, muy tardío, con pocos macollos, 18 hojas, de 10.5 cm de ancho y 95 cm de longitud de hoja, índice de venación alto y poca pubescencia. Está adaptado a altitudes de 0 a 500 msnm. Las espigas son largas (42.6 cm.) con numerosas ramificaciones, casi el 20% de ellas son secundarias, sin ramificaciones terciarias. Las mazorcas presentan un diámetro de 44 a 48 mm, el diámetro del olote se encuentra en un rango de 25 a 28 mm, la longitud del grano es de 12.8 mm.

Nal-Tel: plantas pequeñas de 1.5 a 2 metros de altura, precoces, sin macollos, con 12 hojas por planta en promedio, índice de venación intermedio, poca pubescencia y se adapta mejor a altitudes menores de 100 msnm. Las espigas son cortas (32.7 cm) con muchas ramificaciones dispuestas a lo largo de gran parte del raquis central, muchas ramificaciones secundarias y pocas ramificaciones terciarias, índice de condensación es el más bajo de todas las razas estudiadas. La mazorca es muy corta (7.9 cm), con ligero adelgazamiento tanto en la base como en el ápice, 11.4 hileras en promedio, pedúnculo muy delgado, granos pequeños redondeados y sin depresión, estrías marcadas, pericarpio sin color. El diámetro de la mazorca es de 26-28 mm, el diámetro del olote es de 19.2 mm, presentan 8 a 11 mm de diámetro del raquis y 7 a 8 mm de longitud del grano

Zapalote Chico: Plantas muy pequeñas, por lo regular de 1 a 2 metros de altura, son muy precoces, con pocos hijuelos y pocas hojas, con índice de venación alto, poca pubescencia y se adaptan a altitudes bajas menores de 100 msnm. Las espigas son muy cortas (34.0 cm), ramificaciones secundarias son frecuentes y no presenta ramificaciones terciarias, su índice de condensación es alto. Las mazorcas muy cortas (9.9 cm) y con 21 a 26 mm de diámetro, con 10 a 12 hileras, con pedúnculo grueso, especialmente en relación con el tamaño de la mazorca. Granos cortos, de espesor y grosor medianos, muy dentados, pericarpio sin color, un diámetro del olote de 21 a 26 mm, diámetro del raquis de 13 a 16 mm y una longitud del grano de 10 a 11 mm.

LITERATURA CITADA

Albrecht B., y Dudley J. 1987. Evaluation of four maize populations containing different proportions of exotic germoplasm. *Crop Sci.* 27:480-486.

Anderson E. and Cutler H. C. Races of *Zea mays*: I. Their recognition and classification. 1942 *Missouri Botanical Garden* 29: 69-86.

De la cruz L. L., J. Ron P., J.L. Ramírez D., J. de J. Sánchez G., M.M. Morales R., M. Chuela B., S. A. Hurtado de la P., S. Mena M. 2003. Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 1-10.

FAOSTAT. 2018. Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura. Consultado. en <http://www.fao.org/faostat/es/#data> (Mayo, 2018).

FIRA. 2015. Fideicomisos Instituidos en relación con la Agricultura. (Panorama agrícola). Consultado el 05 de noviembre del 2017.

FIRA. 2016. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (Panorama agrícola). Consultado el 06 de noviembre del 2017.

García Z., J., J. López R., J. Molina G., y T. Cervantes S. 2002. Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una crusa intervarietal F2 de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25: 387-391.

Gómez- Espejo, A.L., J.D. Molina- Galán, J.J. García- Zavala, M. C. Mendoza- Castillo, y A. de-la-Rosa-Loera. 2015. Poblaciones exóticas originales y adaptadas de maíz. I: variedades locales de clima templado x variedades tropicales. *Rev. Fitotec. Mex.* 38: 57-66.

Goodman M., M. 1999. Coors J. G. y S. Pandey. The genetics and exploitation of heterosis in crops. Copyright South Segoe Road, Madison, USA. pp 139- 148.

Goodman M., M.1965. Estimates of genetic variance in adapted and exotic populations of Maize. *Crop Sci* 5:87-90

Gouesnard B., J. Sanou, A. Panouillé, V. Bourion, A. Boyat. 1996. Evaluation of agronomic traits and analysis of exotic germplasm polymorphism in adapted x exotic maize crosses. *Theor. Appl. Genet.* 92: 368-374.

Hallauer A. R., M.J. Carena and J.B. Miranda Filho. 2010. Quantitative genetics in maize breeding. Tercera edición. Springer-Verlag, New York, USA. pp: 558-570.

Hallauer A.R. and Carena M.J. 2009. Maize breeding: *In: Cereals*. M.J. Carena (ed) Springer-Verlag New York, USA. pp: 3-98

Hallauer A. R. and J. H. Sears. 1972. Integrating exotic germplasm into corn belt maize breeding programs. *Crop Science* 12: 203-206

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

Matsuoka Y., Y. Vigouroux, M.M. Goodman, J. Sánchez, E. Buckler and J. Doebley. 2002. A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *PNAS* 30: 6080-6084.

Moll, R. H., J. H. Lonquist, J. V. Fortuno, and E. C. Johnson. 1965. The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics* 52: 139-44.

Morales R., M.M., J. Ron P., J.J. Sánchez G., J.L. Ramírez D., L. De la Cruz L., S. Mena M., S. Hurtado de la P., y M. Chuela B. 2007. Relaciones fenotípicas y heterosis entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Méx.* 30: 285-294.

Muñoz O., A. 2003. Centli-maíz. Prehistoria e historia, diversidad, potencial, origen genético y geográfico. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 210 p.

Nava P., F., J.A Mejía C., F. Castillo G., y J.D. Molina G. 2000. Evaluación de maíces precoces e intermedios en valles altos centrales de México. I. Poblaciones sobresalientes. *Rev. Fitotec. Mex.* 23: 119-128.

Navas A., A., y T. Cervantes. 1992. Selección en cruzas interraciales tropicales de maíz de México para adaptación a valles altos. *Agronomía Mesoamericana* 3: 23-33.

Nelson P.T., y Goodman M.M. 2008. Evaluation of elite exotic maize inbreds for use in temperate breeding. *Crop Sci.* 48: 85-92.

Palemón A., F., N.O. Gómez M., F. Castillo G., P. Ramírez V., J.D. Molina G., y S. Miranda C. 2012. Cruzas intervrietales de maíz para la región semicálida de Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 745-755.

Pérez-Colmenarez, A.A., J.D. Molina-Galán, y A. Martínez-Garza. 2000. Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34: 533-542.

Pérez C., A., J.D. Molina G., y A. Martínez G. 2002. Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. 25: 435- 441.

Ponce A., D. V. 2002. Comportamiento de variedades de maíz (*Zea mays* L.) originales y adaptadas de razas mexicanas tropicales y subtropicales y de sus cruzas con variedades de clima templado. Tesis doctoral. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. México pp: 1-99.

SIAP. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2017) Producción anual de cultivos año agrícola 2017 en México. <http://www.siap.gob.mx>. (Abril, 2018).

Vidal M., V.A., G. Vázquez C., B. Coutiño E., A. Ortega C., J.L. Ramírez D., R. Valdivia B., M. de J. Guerrero H., F. de J. Caro V., O. Cota A. 2008. Calidad proteínica en colectas de maíces criollos de la sierra de Nayarit, México. Revista Fitotecnia Mexicana 31:15-21.

Vigouroux Y., J.C Glaubitz, y. Matsuoka, M.M. Goodman, J. Sánchez G. y J. Doebley. 2008. American Journal of Botany 95: 1240-1253.

Wellhausen J., M. Roberts, E. Hernández, y P. Mangelsdorf. 1951. Razas de Maíz en México, su origen, características y distribución. Imprenta Aldina Rosell y Sordo Noriega, S. de R. L. Cd. de México. pp: 11-223.

Yong H., D. Zhang, J. Wang, M. Li, W. Liu, X. Zhang, H. Zhao, J. Weng, Z Hao, L. Bai, X. Ci, X. Li, S. Zhang. 2013. Broadening the genetic base of Chinese maize heterotic pools with exotic germplasm. Crop sci. 53: 1907-1916.

CAPÍTULO I. RENDIMIENTO, COMPONENTES DE RENDIMIENTO Y HETEROSIS DE GERMOPLASMA EXÓTICO DE MAÍZ ADAPTADO A VALLES ALTOS

RESUMEN

Los materiales exóticos de maíz (*Zea mays* L.) son una fuente de alelos favorables para usarse en programas de mejoramiento genético, pero antes de ser empleados se deben adaptar a las condiciones ambientales de interés. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento y sus componentes entre poblaciones de maíz tropical y subtropical adaptadas por selección masal a Valles Altos de México, así como la heterosis de sus cruzas interraciales, para identificar genotipos útiles al mejoramiento genético del maíz para esos ambientes. Se evaluaron nueve poblaciones de maíz exótico, ocho de sus cruzas simples, una craza triple, generaciones avanzadas de las cruzas y cuatro testigos. Los genotipos se evaluaron en tres ambientes bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones y donde la unidad experimental fueron dos surcos de 6 metros, separados a 0.80 m con matas de dos plantas cada 50 cm. Se registró el rendimiento y seis de sus componentes. Se realizó un análisis de varianza, una comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$), un análisis de correlación y se estimó la heterosis con respecto al progenitor medio. Hubo significancia ($P \leq 0.01$) entre genotipos para todos los caracteres; los materiales exóticos rindieron de 3.89 a 11.17 t ha⁻¹ y los testigos de 8.06 a 11.56 t ha⁻¹. El rendimiento de los testigos y del Tuxpeño correlacionó con longitud y diámetro de mazorca y número de granos por hilera. La heterosis promedio para rendimiento y sus componentes fluctuó de -5.30 a 6.53 %, siendo positiva para rendimiento (5.68 %) con valores individuales de 4.3 a 26.19 %, por lo que el rendimiento de las cruzas aumentó. El germoplasma exótico y sus cruzas presentaron rendimientos aceptables, por esto pueden ser empleadas *per se* o en el mejoramiento genético del maíz local de Valles Altos.

Palabras clave: *Zea mays* L., adaptación, componentes de rendimiento, germoplasma exótico, heterosis, selección, rendimiento.

ABSTRACT

Exotic maize (*Zea mays* L.) germplasm is a source of favorable novel alleles for maize breeding programs, but before being used they must be adapted to different climatic conditions. The objective of this work was to evaluate the yield and its components in populations of tropical and subtropical maize adapted by mass selection to High Valleys of Mexico, as well as to estimate the heterosis of their interracial crosses in order to identify useful genotypes for the genetic improvement of maize in the High Valleys. Nine populations of exotic maize, eight of their single crosses, one triple-cross, advanced generations of the crosses, and four controles were evaluated. The genotypes were evaluated in three environments in a randomized complete block design with three replications and plots of two rows of 6 m and 0.80 m apart with two-plant hills every 50 cm; grain yield and six of its components were recorded. An analysis of variance was performed for each trait, a Tukey's means ($p \leq 0.05$) comparison, a correlation analysis, and the heterosis was estimated with respect to the mean progenitor. There was significance ($P \leq 0.01$) among genotypes for each trait; the exotic materials yielded from 3.89 to 11.17 t ha⁻¹ and the controles from 8.06 to 11.56 t ha⁻¹. The yield of the controles and Tuxpeño were correlated with length and diameter of ear and number of grains per row. The average heterosis for yield and its components fluctuated from -5.30 to 6.53 %, and it was positive for yield (5.68 %) with individual values from 4.3 to 26.2 %, so that the yield of the crosses increased. The exotic germplasm and its crosses had acceptable yields, so they can be used *per se* or in the genetic improvement of the local maize of Mexican high valleys.

Index words: *Zea mays* L., adaptation, yield components, exotic germplasm, heterosis, selection, yield.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético es el arte y la ciencia que permite el desarrollo de cultivares superiores (Hallauer *et al.*, 2010). Esto consiste en generar genotipos idóneos que se adapten a diferentes ambientes y que cumplan con las necesidades de la sociedad y de los productores.

El maíz (*Zea mays* L.) posee una variabilidad genética enorme. No obstante, en general, la mayoría de los programas de mejoramiento se han enfocado al uso de líneas o variedades que se originaron a partir del entrecruzamiento de pocos materiales élite ya existentes (Goodman, 1999). Esto provocó un estancamiento en la generación de nuevas variedades (La Cruz Larios *et al.*, 2003). Es por ello, muy importante el conocimiento sobre la diversidad genética para hacer un uso más efectivo y eficiente del germoplasma disponible en los programas de mejoramiento (Adeolu *et al.*, 2015).

Las poblaciones nativas de maíz en México son una fuente valiosa de variantes alélicas, porque las variedades de cada raza, en su proceso de selección continua y dinámica por los agricultores, han adquirido características específicas de adaptación para regiones agrícolas específicas (Prasanna, 2012). En este contexto, una alternativa para ampliar la variabilidad genética del maíz dentro de cada región agrícola, es la introducción y uso de germoplasma exótico, con ello, además de aportar genes nuevos y variedades diferentes a las locales, se podría incrementar la heterosis de rendimiento entre cruza de germoplasma diferente (Mickelson *et al.*, 2001) y su tolerancia a plagas y enfermedades, y a otros factores adversos (Hallauer y Carena, 2009).

No obstante, emplear germoplasma exótico de maíz en una región exitosamente no es sencillo, porque requiere de una fase previa de adaptación a las condiciones ambientales donde será utilizado (Gouesnard *et al.*, 1996). En este sentido, diferentes autores han demostrado que la selección masal recurrente es una metodología eficiente para la adaptación de maíz exótico tropical a Valles Altos de México. Esto debe permitir que en ciclos avanzados de selección se pueda explotar las varianzas genéticas aditiva y de dominancia, y que sus poblaciones resultantes puedan ser empleadas *per se* o en la formación de variedades e híbridos con mayor heterosis en rendimiento, sus componentes, y otras características de interés para productores y consumidores (Pérez-Colmenarez *et al.*, 2000; Gómez-Espejo *et al.*, 2015).

Diferentes trabajos confirman las bondades de usar germoplasma exótico adaptado a una región agrícola, particularmente de materiales originarios del trópico y adaptados a una región templada. Gómez-Espejo *et al.* (2015) encontraron valores de heterosis altos para rendimiento entre maíz

Chalqueño por Tepecintle (16 a 58.5 %), y entre la cruce Tepecintle original x Tepecintle adaptado (126 %).

Asimismo, Carrera-Valtierra y Cervantes-Santana (2002) encontraron mayor heterosis al cruzar líneas tropicales de maíz con líneas locales de Valles Altos (90.36 a 164.86 %) comparado con cruces entre líneas tropicales previamente adaptadas a Valles Altos (17.24 a 40.19 %). De manera similar, Palemón *et al.* (2012) encontraron heterosis del 10.6 % en promedio para cruces intervarietales de germoplasma tropical adaptado y subtropical en la región semicálida de Guerrero.

En México, son pocos los programas de mejoramiento genético de maíz que han adaptado e incorporado germoplasma exótico para ampliar la base genética de sus materiales e incorporarles genes favorables (Gómez-Espejo *et al.*, 2015). En el campus del Colegio de Postgraduados (CP) en Montecillo, Estado de México, se cuenta con diez razas tropicales y subtropicales de maíz que fueron sometidas a selección masal visual para adaptación. En esta localidad, prevalecen condiciones de clima templado (Pérez *et al.*, 2002). En este contexto, los objetivos del presente trabajo fueron a) evaluar el rendimiento y sus componentes en poblaciones de maíz tropical y subtropical adaptado por selección a Valles Altos y en sus cruces interraciales, y b) evaluar la heterosis de cruces interraciales de maíz exótico tropical y subtropical adaptado por selección a Valles Altos, para identificar y seleccionar genotipos con uso potencial para el mejoramiento genético del maíz de Valles Altos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal

Se evaluaron siete poblaciones de maíz exótico adaptadas a Valles Altos mediante 20 ciclos de selección masal visual (Pérez *et al.*, 2002), en el ciclo agrícola primavera- verano del año 2017: Pepitilla (P1), Tabloncillo (P2), Comiteco (P3), Celaya (P4), Vandeño (P5), Tepecintle (P6), y Nal-Tel (P8); dos poblaciones con 19 ciclos de selección masal: Tuxpeño (P7) y Zapalote Chico (P9); ocho cruces simples formadas entre poblaciones adaptadas: F1(P1XP3), F1(P2XP1), F1(P4XP1), F1(P4XP3), F1(P7XP5), F1(P6XP5), F1(P7XP6), F1(P9XP8); dos cruces dobles: F1(P2P1XP4P3) y F1(P5P7XP6P7); una cruce triple: F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6); tres generaciones F2: F2(P9XP8), F2(P2P1XP4P3) y F2(P5P7XP6P7); dos generaciones F3: F3(P9XP8) y F3(P2P1XP4P3); una generación F4: F4(P9XP8); y cuatro testigos locales de maíz Chalqueño: híbrido Promesa (H-PROMESA), híbrido San Josecito (H-SJOSECITO), Criollo de San Juan Tezontla (CSJTEZONTLA) y Compuesto Xolache (COM.XOLACHE).

Ubicación

La evaluación agronómica se realizó en tres ambientes durante el ciclo agrícola de 2017. En el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, en Montecillo, Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2250 msnm, se establecieron dos experimentos de evaluación, que se consideraron ambientes diferentes debido a que las características edáficas y de humedad de los dos lotes fueron contrastantes; además, cada experimento tuvo fecha de siembra diferente. El tercer lote de evaluación se ubicó en el Campo Agrícola Experimental “San Martín” de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Manejo agronómico

La preparación del terreno en los tres ambientes consistió en un barbecho, un paso de rastra, y posteriormente se realizó el surcado. La siembra se realizó el 17 y 23 de mayo de 2017 para los ambientes de Montecillo, y el 25 de mayo para el ambiente de Chapingo. En los tres ambientes se sembró a una densidad de población de 54,166 plantas/ha.

La dosis de fertilización fue 160-80- 00. Se aplicó todo el P_2O_5 y la mitad del N a la siembra; y el resto del N se aplicó al aporque (35 días después de la siembra (dds)).

Para el control de maleza se aplicó Gesaprim Calibre 90 GDA[®] (1 kg ha⁻¹) combinado con Primagran[®] Gold (3 L ha⁻¹) siete dds, y posteriormente a los 60 dds una mezcla de Gesaprim Calibre 90 GDA[®] más Gramoxone[®] y detergente Roma[®] como surfactante.

Diseño experimental

Los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental estuvo conformada por una parcela de dos surcos de 6 metros de largo separados a 0.80 m y matas de dos plantas cada 50 cm, para obtener un total de 52 plantas por parcela. La siembra de cada parcela se hizo manualmente con pala, depositándose dos semillas por sitio y no se hizo aclareo de plantas.

Caracteres evaluados

Los caracteres evaluados fueron: rendimiento de mazorca a humedad constante (REN, t ha⁻¹), índice de prolificidad (IP, número de mazorcas/planta), longitud de mazorca (LM, cm), diámetro de mazorca (DM, cm), número de hileras por mazorca (NHM), número de granos por hilera (NGH) y peso de 200 granos (PDG, g).

Los componentes del rendimiento LM, DM, NHM, NGH y PDG se midieron en una muestra de diez mazorcas representativas en cada parcela. El IP se obtuvo al dividir el número de mazorcas cosechadas en la parcela entre el número total de plantas de la parcela.

Para estimar el REN, se obtuvo el rendimiento de mazorca por planta (RMP) al dividir el peso seco a humedad constante del total de mazorcas de la parcela entre el número de plantas cosechadas con competencia completa en la parcela; este valor se multiplicó por la densidad de plantas por hectárea (54,166) para obtener el REN ($t\ ha^{-1}$).

Análisis estadístico

Para todos los caracteres se realizaron análisis de varianza combinado de los tres ambientes, comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) y un análisis de correlación fenotípica entre los caracteres. Estos análisis se hicieron mediante el paquete estadístico SAS[®] 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

La heterosis con respecto al progenitor medio considerando los tres ambientes de forma combinada se calculó con la fórmula $H = [(F1 - PM) / PM] \times 100$, donde H: heterosis porcentual (%); F1: media fenotípica de la población F1; $PM = (P_i + P_j) / 2$, media fenotípica del progenitor medio; P_i , y P_j : media fenotípica del padre i y del padre j (Falconer y Mackay, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de Varianza

El análisis de varianza (Cuadro 1.1) detectó diferencias significativas entre las medias de genotipos (GEN) para todos los caracteres. Esto puede atribuirse en parte a que los materiales genéticos de las cruzas son de origen geográfico diferente y no obstante su adaptación por selección, presentan variación genética intrínseca entre ellos, porque los genotipos exóticos pueden tener expresión fenotípica diferente bajo condiciones ambientales de Valles Altos (Gómez-Espejo *et al.*, 2015). Por otro lado, el haber incluido genotipos productivos localmente adaptados como testigos también contribuyó a la significancia de esta fuente de variación.

Cuadro 1.1. Análisis de varianza combinado del rendimiento y componentes de rendimiento de poblaciones y cruza interracial de maíz tropical adaptado a Valles Altos

FV	GL	REN (t ha ⁻¹)	IP (número)	LM (cm)	DM (cm)	PDG (g)	NHM (número)	NGH (número)
AMB	2	181.37**	4.54**	4.42**	0.06	282.99**	0.03	9.47*
REP(AMB)	6	9.80**	0.13*	0.80*	0.11**	6.77	0.96	5.67
GEN	29	49.31**	0.21**	32.28**	1.13**	864.74**	16.47**	150.81**
GEN*AMB	58	3.05*	0.06	0.91**	0.03	48.01**	0.74*	4.58**
ERROR	174	1.9	0.05	0.3	0.03	6.69	0.48	2.83
CV		16.46	15.96	3.84	3.55	4.12	4.76	5.43

**= $P \leq 0.01$; * = $P \leq 0.05$; FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera.

El análisis de varianza también detectó significancia entre ambientes para IP, REN, LM, PDG y NGH, esto indicó que al menos un ambiente mostró un comportamiento diferente al de los otros para el valor promedio de estas características. Lo anterior se atribuye a diferencias ambientales con efectos contrastantes entre sitios; por ejemplo, la variación en la precipitación a través y dentro de los ambientes, además de las características edáficas diferentes donde se establecieron los genotipos, como textura del suelo, salinidad, y pH (López *et al.*, 2017), lo cual provocó diferente retención de humedad y por consiguiente variabilidad en los procesos fisiológicos de las plantas.

Por otro lado, la interacción genotipo x ambiente (Cuadro 1.1) resultó significativa para todos los caracteres, excepto para IP y DM. Lo anterior indicó que las diferencias entre las medias de los genotipos, no fueron consistentes a través de ambientes para las características con significancia; mientras que para IP y DM sí se identificó tal consistencia a través de los ambientes de prueba. La significancia de la interacción genotipo x ambiente pudo ser causada por las características distintivas de cada ambiente y su efecto diferencial sobre la respuesta de cada uno de los genotipos a tal efecto (García *et al.*, 2002).

Los coeficientes de variación resultaron de magnitud aceptable, con un intervalo de 3.54 a 16.45 %. Esto sugirió que el experimento se realizó bajo un manejo correcto, lo cual minimizó el error experimental y dio validez a los resultados obtenidos.

Comparación de medias

Según la comparación de medias de REN (Cuadro 1.2), la población Tuxpeño (P7) (11.71 t ha⁻¹) y el testigo H- PROMESA (11.56 t ha⁻¹) fueron miembros del grupo estadísticamente superior ($P \leq 0.05$). Este resultado es interesante porque implica que la población de Tuxpeño adaptada por selección masal a condiciones de Valles Altos tiene un rendimiento competitivo con el testigo que en ningún caso fue superado ni numéricamente ni estadísticamente. De acuerdo con Prasanna (2012), la población tropical Tuxpeño seleccionada presenta mayor efecto de alelos adaptativos para rendimiento, lo que la hace tener un mejor rendimiento *per se* y genera cruzas sobresalientes, como la F1(P7XP6) (10.74 t ha⁻¹), F1(P7XP5) (8.89 t ha⁻¹) y F1(P5P7XP6P7) (8.73 t ha⁻¹), y esto confirma que esta población conforma buenos patrones heteróticos, tal como lo sugirió Goodman (2005).

Cabe mencionar que Zapalote Chico (P9) (3.89 t ha⁻¹) y Nal-Tel (P8) (4.2 t ha⁻¹) tuvieron los rendimientos más pequeños ($P \leq 0.05$), aunque rendimientos superiores al promedio de Valles Altos (2.79 t ha⁻¹) (SIAP, 2017), pero presentan un ciclo vegetativo corto (68 y 73 días, respectivamente) y esto representaría una ventaja para Valles Altos, donde el periodo libre de heladas es corto, porque permitirían obtener un ciclo en siembras tardías o inclusive dos por año.

Respecto al índice de prolificidad, la población P7 (Tuxpeño) fue significativamente superior (1.66 mazorcas/planta) ($P \leq 0.05$), y le siguieron las poblaciones Pepitilla (P1) y Tepecintle (P6) con 1.63 y 1.62 mazorcas/planta, respectivamente. En relación con lo anterior, el rendimiento es una medida de la capacidad reproductiva de las plantas (Hallauer *et al.*, 2010), porque el grado de adaptación del maíz exótico está relacionado con su capacidad de producir una descendencia robusta y productiva en la zona donde se introdujo (Gómez-Espejo *et al.*, 2015). Debido a que esta capacidad impacta directamente el rendimiento potencial de grano (Montenegro *et al.*, 2010), se podría inferir que las poblaciones P7, P1 y P6 presentaron un mayor grado de adaptación a Valles Altos, comparado con el resto de poblaciones.

Para LM, esta fluctuó de 10.55 a 17.47 cm. La del testigo H-SJOSECITO (17.47 cm) fue el mayor estadísticamente (17.47 cm) ($P \leq 0.05$), seguido por la población Comiteco (P3) (16.39 cm). Estos valores son congruentes con los reportados por Hernández y Esquivel (2004) para cruzas de maíz criollo de Valles Altos. En cambio, Carrera y Cervantes (2006) encontraron que cruzas dobles de maíz tropical y subtropical presentan mayor longitud de mazorca que los híbridos para Valles Altos. Por lo anterior, P3 representaría una opción adecuada para mejorar este carácter.

Cuadro 1.2 Comparación de medias (análisis combinado) del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales adaptadas a Valles Altos.

GEN	REN (t ha ⁻¹)	IP (número)	LM (cm)	DM (cm)	PDG (g)	NHM (número)	NGH (número)
F1(P2P1XP4P3)	9.36a-e	1.37a-e	15.91b-d	4.58d-g	67.88c	14.44e-g	34.01a-c
F1(P5P7XP6P7)	8.73c-f	1.36a-e	14.68e-g	4.69d-f	63.17d-g	14.96d-f	32.27b-d
F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6)	7.86e-f	1.35a-e	14.6e-g	4.51e-g	57.12i-j	14.81d-f	31.52c-e
F1(P1XP3)	10.05a-e	1.41a-d	15.82b-d	4.72d-f	60.49f-i	16.34a-c	35.86a
F1(P2XP1)	10.99a-c	1.53a-c	15.51b-e	4.75c-e	67.78c-d	15.21c-e	34.36a-c
F1(P4XP1)	9.79a-e	1.34a-e	15.56b-e	4.6d-g	68.14c	14.69d-g	35.14a-b
F1(P4XP3)	9.93a-e	1.29a-e	16.09b-c	4.85b-d	66.47c-e	15.8b-d	35.16a-b
F1(P6XP5)	9.07b-f	1.58a-b	14.17g-h	4.45f-h	57.77h-j	14.53e-g	32.23b-d
F1(P7XP5)	8.89b-f	1.38a-d	15.45b-e	4.6d-g	56.5i-j	15.01d-f	34.42a-c
F1(P7XP6)	10.74a-d	1.54a-c	15.79b-d	4.7d-f	60.97f-i	14.5e-g	34.76a-b
F1(P9XP8)	5.1g-h	1.18c-e	11.87j	4.16i-j	62.54e-g	12.52j-k	25.24g-h
F2(P2P1XP4P3)	9.71a-e	1.4a-d	15.85b-d	4.59d-g	63.78c-f	15.13c-f	34.89a-b
F2(P5P7XP6P7)	8.36d-f	1.38a-e	15.39c-f	4.63d-g	62.64e-g	14.91d-f	32.92a-c
F2(P9XP8)	4.37g-h	1.25b-e	11.05j-k	4.01j-k	53.97j-k	13h-j	23.38h
F3(P2P1XP4P3)	9.68a-e	1.45a-d	15.44b-e	4.64d-g	65.7c-e	15.07d-f	33.69a-c
F3(P9XP8)	4.49g-h	1.27a-e	10.56k	3.94j-k	50.16k-l	13.56g-i	23.37h
F4(P9XP8)	4.08h	1.24b-e	10.55k	3.92j-k	48.46l-m	12.69i-j	23.92h
PEPITILLA (P1)	9.34a-e	1.63ab	14.4f-h	4.54e-g	64.87c-f	13.9f-i	31.58c-e
TABLONCILLO (P2)	8.68c-f	1.52a-c	15.1d-g	4.39g-i	79.54b	11.39k	28.58e-f
COMITECO (P3)	9.9a-e	1.46a-d	16.39b	4.6d-g	58.56g-j	15.56c-e	34.36a-c
CELAYA (P4)	8.13e-f	1.29a-e	15.18c-f	4.59d-g	64.8c-f	14.61d-g	32.14b-d
VANDEÑO (P5)	6.78f-g	1.45a-d	13.16i	4.2h-j	51.36k-l	14.44e-g	30.06d-f
TEPECINTLE (P6)	8.89b-f	1.62a-b	13.53h-i	4.58d-g	62.19e-h	14.42e-g	27.1f-g
TUXPEÑO (P7)	11.71a	1.66a	14.17g-h	4.64d-g	51.76k-l	15.42c-e	33.69a-c
NAL- TEL (P8)	4.2h	1.34a-e	11.63j	3.84k	44.33m	14.38e-g	24.86g-h
ZAPALOTE- CHICO(P9)	3.89h	0.98e	10.55k	4.06j-k	60.28f-i	11.44k	23.39h
CSJTEZONTLA	8.06e-f	1.08d-e	15d-g	5.09a-b	90.3a	13.93f-h	32.42b-d
COM. XOLACHE	8.29d-f	1.27a-e	14.66e-g	5.04a-c	66.8c-e	17.24a	30.41d-e
H-PROMESA	11.56a	1.39a-d	14.66e-g	5.24a	75.4b	16.82a-b	30.4d-e
H-SJOSECITO	11.23a-b	1.28a-e	17.47a	5.11a-b	80.01b	15.54c-e	34.5a-c
DHS _(0.05)	2.48	0.39	0.98	0.28	4.64	1.24	3.02

Medias con letras iguales dentro de la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05);

GEN: Genotipo; IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera; DHS: Diferencia honesta significativa.

Para PDG, el criollo de San Juan Tezontla (CSJTEZONTLA) de la raza Chalqueño, fue estadísticamente superior (90.3 g), lo cual concordó con lo reportado por Miguel *et al.* (2004), quienes encontraron que las variedades de maíz criollo de la raza Chalqueño fueron superiores respecto a un híbrido comercial y presentaron un PDG de 102.6 g. En contraste, las poblaciones tropicales y sus cruza presentaron menor peso de grano; esto es consistente con lo encontrado por Cázares-Sánchez *et al.* (2015), quienes indicaron que para maíz tropical el porcentaje de almidón en el grano fluctúa de 57.54 a 69.92 %, que los hace más ligeros en comparación con maíces originarios de regiones templadas, como el Chalqueño. Respecto al NHM, el del testigo COM.XOLACHE perteneciente a la raza Chalqueño, fue estadísticamente superior a los demás genotipos, con 17.24 hileras ($P \leq 0.05$). Lo anterior fue debido a que la raza Chalqueño presenta mayor NHM comparado con los maíces tropicales y subtropicales (Wellhausen *et al.*, 1952).

Por otro lado, la F1 de la crusa simple Pepitilla x Comiteco (P1 x P3) fue mejor significativamente en NGH con 35.86, y este valor fue similar a los que encontraron Espinosa-Calderón *et al.* (2012), pues las generaciones F1 y F2 de híbridos trilineales de maíz para Valles Altos tuvieron de 26 a 31 NGH. Por esto, este genotipo cumple con el valor típico de este carácter para Valles Altos.

En cuanto al DM, la media de H-PROMESA fue superior respecto a los demás (5.23 cm); en contraste, el material Nal-Tel (P8) fue el de menor DM (3.84 cm). Estos resultados coincidieron con los de Martínez-Lázaro *et al.* (2006), quienes encontraron que los híbridos Promesa y HS-2 fueron superiores en DM (5.2 cm) a los híbridos de maíz de crusa simple evaluados para Valles Altos.

Los resultados anteriores permiten considerar que la selección masal aplicada por varios ciclos en Valles Altos a poblaciones de maíz exótico tropicales, propició su adaptación a las condiciones templadas de Valles Altos. Esta adaptación expresada en términos de incrementos del rendimiento y sus componentes de las poblaciones evaluadas (Hallauer *et al.*, 2010; Gómez-Espejo *et al.*, 2015), implica la pertinencia de la presente investigación, porque con materiales adaptados se podrá generar variedades nuevas y ampliar la base genética de las variedades locales para mejorar el rendimiento de maíz de Valles Altos (Badu-Apraku *et al.*, 2015; Edmeades *et al.*, 2017).

Heterosis

La heterosis promedio para todos los caracteres evaluados en tres ambientes con respecto al progenitor medio, fluctuó de -5.30 a 6.53 % (Cuadro 1.3). Para rendimiento de grano promedió de 5.68 %, con algunos valores individuales de 4.3 a 26.19 %. A la crusa F1 (P9XP8) correspondió la

mayor heterosis (26.19 %) y un REN de 5.1 t ha⁻¹, superior a la media de Valles Altos de 2.79 t ha⁻¹ (SIAP, 2017). Estos valores se asemejan a los reportados por Escorcía-Gutiérrez *et al.* (2010) y Palemón *et al.* (2012).

Para índice de prolificidad (IP), solo las cruzas F1 (P6XP5) y F1 (P9XP8) presentaron heterosis positiva individual (3.0 % y 2.0 %, respectivamente), y la heterosis promedio de IP fue negativa (-5.3 %), esto indicó que IP no exhibe heterosis favorable, aunque en la mayoría de las cruzas simples esta aparente pérdida de prolificidad de mazorca por planta se compensó con heterosis positivas para el rendimiento de mazorca y sus componentes.

La heterosis promedio para LM fue 4.73 %, con una fluctuación de -6.03 % a 13.99 %; la F1 (P5P7XP6P7) presentó heterosis negativa para este carácter (-6.03 %); en cambio, las cruzas simples F1 (P7XP5) (13.05%) y F1 (P7XP6) (13.99 %) fueron las de mayor heterosis. Este resultado pudo deberse a que la craza doble contiene un progenitor en común, lo que generó *loci* comunes para longitud de mazorca, y por lo tanto una menor divergencia genética y expresión del carácter (La Cruz Larios *et al.*, 2003).

La heterosis promedio para DM fue 2.31 %. La craza que presentó mayor heterosis fue F1 (P9XP8) con 5.35 %. Estos resultados fueron similares a los reportados por Amiruzzaman *et al.* (2010), quienes encontraron heterosis de -12.16 a 8.78 % para DM en cruzas de líneas de maíz.

El NGH y PDG son componentes de rendimiento importantes, por lo cual se busca que la heterosis para estos caracteres sea positiva. El carácter NGH fluctuó entre -6.71 a 14.35 %. A la craza F1 (P7XP6) correspondió la mayor heterosis (14.35 %), esto significó que la combinación de Tuxpeño con Tepecintle resultó buena para esta característica. Así, La Cruz Larios *et al.* (2003) encontraron heterosis de 1 a 24 % para NGH en cruzas de poblaciones exóticas y adaptadas x exóticas de maíz. Por lo anterior, se podría inferir que las poblaciones exóticas de maíz adaptadas a Valles Altos de este trabajo presentaron divergencia genética para NGH, lo que favoreció al rendimiento.

La heterosis para PDG fluctuó entre -6.13 y 19.58 %. La craza con mayor heterosis fue F1(P9XP8) (19.58 %), esto indicó que aunque los progenitores son de semilla pequeña y de rendimiento menor, poseen características que impactan positivamente el rendimiento de grano cuando se cruzan, y podrían ser empleadas para el mejoramiento genético. Asimismo, Amiruzzaman *et al.* (2010) encontraron resultados similares al evaluar cruzas entre líneas de maíz divergente.

Cuadro 1.3 Heterosis respecto al progenitor medio (%) de 11 cruzas de maíz tropical y subtropical para tres ambientes de evaluación.

GENOTIPO/CARÁCTER	IP	REN	LM	DM	PDG	NHM	NGH
F1(P2P1XP4P3)	-2.64	-10.52	0.74	-4.66	1.13	-6.84	-2.14
F1(P5P7XP6P7)	-6.57	-11.03	-6.03	0.98	7.55	1.36	-6.71
F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6)	-10.15	-7.06	2.09	0.34	-3.27	2.25	1.83
F1(P1XP3)	-8.93	4.49	2.74	3.26	-1.98	10.98	8.76
F1(P2XP1)	-2.7	21.99	5.17	6.45	-6.13	20.3	14.22
F1(P4XP1)	-7.86	12.08	5.23	0.72	5.11	3.04	10.31
F1(P4XP3)	-6.49	10.16	1.89	5.57	7.76	4.75	5.73
F1(P6XP5)	3.03	15.73	6.12	1.43	1.75	0.69	12.79
F1(P7XP5)	-11.63	-3.79	13.05	4.01	9.59	0.52	8.00
F1(P7XP6)	-6.32	4.3	13.99	1.93	7.01	-2.83	14.35
F1(P9XP8)	1.96	26.19	7.07	5.35	19.58	-3.01	4.65
PROMEDIO	-5.3	5.68	4.73	2.31	4.37	2.84	6.53

IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera.

El carácter NHM tuvo una heterosis de - 6.84 a 20.30 %. La craza F1 (P2XP1) produjo la mayor heterosis. Esto contrastó con lo reportado por Malik *et al.* (2004), quienes encontraron heterosis de hasta 49.6 % con respecto al progenitor medio, en líneas de origen templado, subtropical y tropical.

Los resultados obtenidos demostraron que el material genético evaluado tiene un gran potencial para ser empleado *per se* o en cruzas interraciales exótico x exótico, y como donante de alelos alternativos al material local de Valles Altos.

Correlación

El análisis de correlación fenotípica (Cuadro 1.4) evidenció correlación positiva entre la mayoría de los caracteres evaluados. El REN correlacionó de manera significativa ($P \leq 0.01$) y positiva con LM ($r= 0.64$), DM ($r=0.65$) y NGH ($r= 0.64$), lo que indica que los genotipos con mayor longitud y diámetro de mazorca, y mayor NGH presentaron mayor rendimiento, tales como P7, H-PROMESA y H-SJOSECITO. Al respecto, diferentes autores observaron correlación positiva entre

REN, NGH, DM y LM (Rafiq *et al.*, 2010; Usha *et al.*, 2017), por lo cual estos componentes deben tomarse en cuenta en el mejoramiento del maíz para Valles Altos.

Cuadro 1.4 Correlaciones entre el carácter de rendimiento y de sus componentes para poblaciones y sus cruza interracial de maíz adaptadas a Valles Altos.

CARÁCTER	IP	REN	LM	DM	PDG	NHM	NGH
IP	1	0.67**	0.12**	0.1	0	0.1	0.16**
REN		1	0.64**	0.65**	0.4**	0.46**	0.64**
LM			1	0.71**	0.51**	0.52**	0.88**
DM				1	0.65**	0.65**	0.65**
PDG					1	0.05	0.31**
NHM						1	0.55**
NGH							1

IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera.

CONCLUSIONES

Las poblaciones de maíz exótico tropical, adaptadas por selección a Valles Altos, presentaron características sobresalientes para rendimiento y sus componentes en las condiciones agronómicas de Valles Altos, las cuales podrían ser empleadas *per se* y en el mejoramiento genético del maíz local.

La población adaptada de Tuxpeño presentó el mayor índice de prolificidad y rendimiento, esto sugiere que esta población podría emplearse *per se* o bien como progenitor junto con poblaciones locales para la creación de variedades mejoradas para la producción de maíz en Valles Altos.

Las poblaciones Zapalote Chico y Nal-Tel son una alternativa de producción para regiones que presentan un ciclo agrícola reducido o para aquellas sin restricciones de humedad, porque se podría obtener más de un ciclo en un año, debido a su ciclo vegetativo precoz.

El rendimiento se correlacionó de manera positiva con longitud de mazorca, diámetro de mazorca y número de granos por hilera, lo cual indica que estos caracteres influyen de manera positiva y

proporcional en el rendimiento, por esto se debe considerar estos componentes para el mejoramiento del rendimiento del maíz en Valles Altos.

Todas las cruzas interraciales de maíz presentaron heterosis positiva en la mayoría de caracteres evaluados, excepto para IP, esto permitió inferir que el germoplasma tropical y subtropical de las razas estudiadas son buenas opciones para mejorar el rendimiento de variedades locales y mejoradas recomendadas para Valles Altos, pues representan patrones heteróticos contrastantes.

LITERATURA CITADA

Adeolu Adebayo M., A. Menkir, M. Gedil, E. Blay, V. Gracen E. Danquah and L. Funmilayo

(2015) Diversity assessment of drought tolerant exotic and adapted maize (*Zea mays* L.) inbred lines with microsatellite markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 18: 147-154, <https://dx.doi.org/10.1007/s12892-014-0076-3>

Amiruzzaman M., M. A. Islam, L. Hassan and M. M. Rohman (2010) Combining ability and heterosis for yield and components characters in maize. *Academic Journal of Plant Sciences* 3: 79-84, [http://www.idosi.org/ajps/3\(2\)10/5.pdf](http://www.idosi.org/ajps/3(2)10/5.pdf)

Badu-Apraku B., M. A. B. Fakorede, M. Gedil, A. O. Talabi, B. Annor, M. Oyekunle, ... M. Aderounmu (2015) Heterotic responses among crosses of IITA and CIMMYT early white maize inbred lines under multiple stress environments. *Euphytica* 206: 245-262, <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1506-0>

Carrera-Valtierra J. A. y T. Cervantes-Santana (2002) Comportamiento *per se* y en cruzas de poblaciones tropicales de maíz seleccionadas en valles altos. *Agrociencia* 36:693-701, <http://www.redalyc.org/pdf/302/30236607.pdf>

Carrera Valtierra. J. A. y T. Cervantes Santana (2006) Respuesta a densidad de población de cruzas de maíz tropical y subtropical adaptadas a valles altos *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:331-338, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61029408>

- Cázares-Sánchez E., J. L. Chávez-Servia, Y. Salinas-Moreno, F. Castillo-Mendoza, P. Vallejo-Ramírez (2015)** Variación en la composición del grano entre poblaciones de maíz (*Zea mays* L.) nativas de Yucatán, México. *Agrociencia* 49: 15-30, <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n1/v49n1a2.pdf>
- Edmeades G. O., W. Trevisan, B. M. Prassana and H. Campos (2017)** Tropical maize: *In: Genetic Improvement of Tropical Crops*. H. Campos and P. D. S. Caligari (eds). Springer-Verlag, New York, USA. pp: 57-110.
- Escorcia-Gutiérrez N., J. D. Molina-Galán, F. Castillo-González y J. A. Mejía-Contreras (2010)** Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruza simples de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 271-279, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61014249011>
- Espinosa-Calderón A., M. Tadeo-Robledo, I. Arteaga-Escamilla, A. Turrent-Fernández, M. Sierra-Macías, N. Gómez-Montiel, ... E. Canales-Islas (2012)** Rendimiento de las generaciones F1 y F2 de híbridos trilileales de maíz en los valles altos de México. *Universidad y Ciencia* 28: 57-64, <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v28n1/v28n1a6.pdf>
- Falconer D. S. and T. F. C. Mackay (1996)** Introduction to Quantitative Genetics. Longman Group Ltd, Harlow, England. 464 p.
- García Zavala. J. J., J. López Reynoso, J. D. Molina Galán y T. Cervantes Santana (2002)** Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una cruz intervarietal F2 de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 387-391, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61025408>
- Gómez-Espejo A. L., J. D. Molina-Galán, J. J. García-Zavala, M. C. Mendoza-Castillo y A. de-la-Rosa-Loera (2015)** Poblaciones exóticas originales y adaptadas de maíz. I: variedades locales de clima templado x variedades tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38: 57-66, <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/38-1/6a.pdf>

Goodman, Major M. (1999) Broadening the genetic diversity in Maize breeding by use of exotic germplasm. *In: The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops*. J. G. Coors y S. Pandey (eds). ASA, CSSA, Madison, WI, USA. pp 139- 148.

Goodman, Major M. (2005) Broadening the U. S. maize germplasm base. *Maydica* 50: 203-214, <https://pdfs.semanticscholar.org/e21b/a03c533655752cc9ad18721f6af43c7dca61.pdf>

Gouesnard B., J. Sanou, A. Panouille, V. Bouriuin and A. Boyat (1996) Evaluation of agronomic traits and analysis of exotic germplasm polymorphism in adapted x exotic maize crosses. *Theoretical and Applied Genetics* 92: 368-374, <https://doi.org/10.1007/BF00223681>

Hallauer A. R. and M.J. Carena (2009) Maize breeding: *In: Cereals*. M.J. Carena (ed) Springer-Verlag New York, USA. pp: 3-98

Hallauer A. R., M.J. Carena and J.B. Miranda Filho (2010) Quantitative Genetics in Maize Breeding. Tercera edición. Springer-Verlag, New York, USA. 663 p.

Hernández Casillas J. M. y G. Esquivel Esquivel (2004) Rendimiento y características agronómicas en germoplasma de maíz de valles altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27: 27-31, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61009906>

La Cruz Larios L., J. Ron Parra, J. L., Ramírez Díaz, J. J. Sánchez González, M. M. Morales Rivera, M. Chuela Bonaparte, ... S. Mena Munguía (2003) Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26: 1-9 <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61026101>

López Guzmán J. A., J. A. Aguilar Castillo, J. J. García Zavala, R. Lobato Ortiz, y P. Sánchez Guzmán. (2017) Comportamiento agronómico de poblaciones de maíz raza Jala en Nayarit y Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 1537-1548, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.510>

Martínez-Lázaro C., L. E. Mendoza-Onofre, G. García-de los Santos, M. C. Mendoza-Castillo y A. Martínez-Garza (2006) Rendimiento de grano de híbridos isogénicos de maíz formados mediante androesterilidad vs desespigamiento. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 365-368, <http://www.redalyc.org/pdf/610/61029412.pdf>

Malik H. N., S. I. Malik, S. R. Chughtai and H. I. Javed (2004) Estimates of heterosis among temperate, subtropical and subtropical maize germplasm. *Asian Journal of Plant Sciences* 3: 6-10, <https://dx.doi.org/10.3923/ajps.2004.6.10>

Mickelson H. R., H. Cordova, K. V. Pixley and M. S. Bjarnason (2001) Heterotic relationships among nine temperate and subtropical maize population. *Crop Science* 41: 1012-1020, <https://dx.doi.org/10.2135/cropsci2001.4141012x>

Miguel Antonio M., J. L. Arellano Vázquez, G. García de los Santos, S. Miranda Colín, J. A. Mejía Contreras y F. V. González Cossio (2004) Variedades criollas de maíz azul raza Chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27: 9-15, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61027102>

Montenegro Torres H., F. Rincón Sánchez, N. A. Ruíz Torres, H. de León Castillo y G. Castañon Nájera (2002) Potencial genético y aptitud combinatoria de germoplasma de maíz tropical. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25: 135-142, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61025203>

Pérez-Colmenarez A. A., J. D. Molina-Galán, A. Martínez-Garza (2000) Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34: 553-542, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30234502>

Pérez Colmenarez A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez Garza. (2002) Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual.

Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:435-441, <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/25-4/14a.pdf>

Palemón Alberto F., N. O. Gómez Montiel, F. Castillo González, P. Ramírez Vallejo, J. D Molina Galán y S. Miranda Colín (2012) Potencial productivo de cruzas intervarietales de maíz en la región semicálida de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3: 157-171, <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n1/v3n1a11.pdf>

Prasanna B. M. (2012) Diversity in global maize germplasm: characterization and utilization. *Journal of Biosciences* 37: 843-855, <https://dx.doi.org/10.1007/s12038-012-9227-1>

Rafiq C. M., M. Rafique, A. Hussain and M. Altaf (2010) Studies on heritability, correlation and path analysis in maize (*Zea mays* L.). *Journal Agriculture Research* 48: 35-38, http://apply.jar.punjab.gov.pk/upload/1374660174_81_34_39Paper-No.4.pdf

SAS Institute Inc. (2002) User's Guide of SAS (Statistical Analysis System). SAS Institute Inc. Cary North Carolina, USA. 550 p.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2017) Producción anual de cultivos año agrícola 2017 en México. <http://www.siap.gob.mx>. (Abril, 2018).

Usha Rani G., V. Satyanarayana Rao, M. Lal Ahamd and K. L. Narasimha Rao (2017) Character association and path coefficient analysis of grain yield and yield components in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6: 4044-4050, <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.612.465>

Wellhausen E. J., L. M., Roberts, E. Hernandez X., P. C. Mangelsdorf (1952) Races of maize in Mexico. The Bussey Institution of Harvard University, Massachusetts, USA, 378 p.

ANEXO

Anexo 1.1. Nomenclatura de los genotipos adaptados por selección a Valles Altos.

RAZA	CLAVE
Pepitilla C20 #	P1C20
Tabloncillo C20 #	P2C20
Comiteco C20#	P3C20
Celaya C20#	P4C20
Vandño C20#	P5C20
Tepecintle C20#	P6C20
Tuxpeño C19#	P7C19
Nal- Tel C20#	P8C20
Zapalote Chico C.19#	P9C19
Pepitilla x Comiteco F1	F1(P1XP3)
Tabloncillo x Pepitilla F1	F1(P2XP1)
Celaya x Pepitilla F1	F1(P4XP1)
Celaya x Comiteco F1	F1(P4XP3)
Tuxpeño x Vandño F1	F1(P7XP5)
Tepecintle x Vandño F1	F1(P6XP5)
Tuxpeño x Tepecintle F1	F1(P7XP6)
Zapalote Chico x Nal- Tel F1	F1(P9XP8)
(Tabloncillo x Pepitilla.)x(Celaya x Comiteco) F1	F1(P2P1XP4P3)
(Vandño x Tuxpeño)x(Tepecintle x Tuxpeño) F1	F1(P5P7XP6P7)
Zapalote Chico x Nal-Tel F2	F2(P9XP8)
(Tabloncillo x Pepitilla.)x(Celaya x Comiteco) F2	F2(P2P1XP4P3)
(Vandño x Tuxpeño)x(Tepecintle x Tuxpeño) F2	F2(P5P7XP6P7)
Zapalote Chico x Nal-Tel F3	F3(P9XP8)
(Tabloncillo x Pepitilla.)x(Celaya x Comiteco) F3	F3(P2P1XP4P3)
Zapalote Chico x Nal Tel F4	F4(P9XP8)
[(Vandño x Tuxpeño) x(Tepecintle. x Tuxpeño)](Vandño x Tepecintle)	F1[(P5P7XP6P7)]X(P5 P6)
Promesa	H- PROMESA
San Josecito	H- SJOSECITO
Criollo De San Juan Tezontla	CSJTEZONTLA
(Compuesto Xolache SM6) C7	COM. XOLACHE

Anexo 1.2. Origen geográfico del germoplasma exótico adaptado por selección a Valles Altos

RAZA	ORIGEN
Pepitilla	Morelos
Tabloncillo	Jalisco
Comiteco	Chiapas
Celaya	Guanajuato
Vandéño	Chiapas
Tepecintle	Chiapas
Tuxpeño	Veracruz
Nal-Tel	Yucatán
Zapalote Chico	Oaxaca

Anexo 1.3 Comparación de medias del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales en un ambiente de evaluación (lote C-8).

GEN	REN (t ha ⁻¹)	IP (número)	LM (cm)	DM (cm)	PDG (g)	NHM (número)	NGH (número)
F1(P2P1XP4P3)	8.89b-g	1.34a-d	15.43a-d	4.53c-i	66.17d-h	14.4d-f	33.93a
F1(P5P7XP6P7)	9.04a-f	1.49a-d	14.2b-g	4.64b-g	60.17f-l	14.8c-e	32.1a-b
F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6)	8.6b-g	1.48a-d	14.47a-e	4.54b-i	59.4g-l	14.87b-c	32.6a-b
F1(P1XP3)	11.13a-b	1.6a-b	14.66a-e	4.78a-f	58.77h-l	16.37a-c	34.77a
F1(P2XP1)	9.6a-f	1.41a-d	15.23a-e	4.77a-f	81.7b	13.6e-h	32.1a-b
F1(P4XP1)	9.67a-e	1.37a-d	15.47a-d	4.62b-g	64.23e-i	15.07b-e	35.2a
F1(P4XP3)	9.01a-f	1.28a-d	15.93a-c	4.83a-e	70.83c-d	15.2b-e	34.77a
F1(P6XP5)	9.27a-f	1.65a-b	13.48d-g	4.32e-j	55j-m	14.73c-e	31.27a-c
F1(P7XP5)	9.38a-f	1.47a-d	15.27a-e	4.67b-g	53.8j-m	15.5a-d	35.23a
F1(P7XP6)	11.3a-b	1.6a-b	15.98a-c	4.79a-f	67.77d-f	14.13d-g	34.57a
F1(P9XP8)	5.36h-k	1.15b-d	12.11g-i	4.29f-j	64.07e-i	12.87f-i	25.9c-f
F2(P2P1XP4P3)	10.66a-c	1.53a-b	15.09a-e	4.53c-i	63.93e-i	14.8c-e	35.03a
F2(P5P7XP6P7)	7.88c-h	1.25a-d	15.5a-d	4.67b-g	62.07f-j	15.07b-e	34.33a
F2(P9XP8)	4.08j-k	1.15b-d	11.76h-i	4.16g-j	53.9j-m	13.6f-h	23.23f
F3(P2P1XP4P3)	9.07a-f	1.4a-d	14.68a-e	4.52d-i	64.47e-i	15.53a-d	33.33a-b
F3(P9XP8)	4.66i-k	1.38a-d	10.5i	4.03i-j	54.83j-m	13.67e-h	23.23f
F4(P9XP8)	4.31j-k	1.29a-d	10.61i	4.08h-j	52.07l-m	12.53g-i	24.27e-f
P1C20	9.44a-f	1.53a-b	13.94c-g	4.62b-g	67.7d-f	14.13d-g	32a-b
P2C20	7.76d-h	1.46a-d	14.43a-e	4.39d-j	81.00b	11.17i	28b-f
P3C20	9.6a-f	1.49a-c	16.22a-b	4.6b-h	55.03j-m	15.73a-d	33.87a
P4C20	7.33e-i	1.16b-d	14.53a-e	4.63b-g	65.47d-h	15.00b-e	30.73a-c
P5C20	6.84f-j	1.49a-c	12.28f-i	4.17g-j	46.97m	14.53d-f	30.13a-d
P6C20	9.41a-f	1.63a-b	13.24e-h	4.63b-g	60.77f-k	14.87b-e	25.53c-f
P7C19	11.71a	1.74a	14.63a-e	4.73a-f	52.9k-m	15.13b-e	34.5a
P8C20	3.86k	1.2b-d	12.22g-i	3.95j	47.3m	14.53d-f	25.67c-f
P9C19	4.59i-k	1.01c-d	11.10i	4.18g-j	57.77i-l	12.07h-i	24.77d-f
CSJTEZONTLA	7.39e-i	0.98d	15.45a-d	5.05a-c	90.43a	13.93e-g	32.7a-b
COM. XOLACHE	6.13g-k	1c-d	14.65a-e	5.07a-b	67.3d-g	17.2a	31.83a-b
H-PROMESA	11.16a-b	1.35a-d	14.41a-f	5.25a	73.6b-d	16.67a-b	29.93a-e
H-SJOSECITO	10.28a-d	1.23a-d	16.47a	4.88a-d	76.53b-c	15.13b-e	33.77a
DHS _(0.05)	2.8	0.5	2.14	0.52	8.28	1.8	5.73

Medias con letras iguales dentro de la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); GEN: Genotipo; IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera; DHS: Diferencia honesta significativa.

Anexo 1.4 Comparación de medias del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales en un segundo ambiente de evaluación (lote C-13).

GEN	REN (t ha ⁻¹)	IP (número)	LM (cm)	DM (cm)	PDG (g)	NHM (número)	NGH (número)
F1(P2P1XP4P3)	7.72a-b	1.09a-b	16.25b-d	4.62b-e	70.97c-d	14.53b-e	33.63a-e
F1(P5P7XP6P7)	7.72a-b	1.18a-b	14.83d-i	4.73a-e	66.13c-f	15a-d	31.87b-f
F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6)	7.13a-f	1.2a-b	14.48f-i	4.43e-i	51.73k-l	14.9a-d	30.53c-f
F1(P1XP3)	8.53a-b	1.21a-b	16.39b-c	4.46e-i	59.17f-k	15.8a-c	35.7a-b
F1(P2XP1)	9.29a	1.33a-b	16.23b-d	4.67b-e	62.37e-h	15.83a-c	34.53a-d
F1(P4XP1)	8.14a-b	1.06a-b	15.71c-g	4.62b-e	66.03c-f	14.73a-d	34.67a-d
F1(P4XP3)	9.01a-b	0.98a-b	15.87b-f	4.73a-e	64.7d-g	15.73a-c	34.37a-e
F1(P6XP5)	6.85a-g	1.14a-b	14.04h-i	4.55c-f	55.9h-l	14.43b-e	32b-f
F1(P7XP5)	6.97a-g	1.2a-b	15.37c-h	4.51d-g	55.1h-l	14.53b-e	33.6a-e
F1(P7XP6)	8.75a-b	1.36a-b	15.76b-f	4.6c-f	57.03g-k	14.77a-d	35.3a-c
F1(P9XP8)	4.29d-g	1.06a-b	11.87j	4.05g-j	62.93d-h	11.83e-f	25.67g-i
F2(P2P1XP4P3)	7.21a-d	1.01a-b	16.17b-e	4.72a-e	62.1e-i	15.53a-c	35.23a-c
F2(P5P7XP6P7)	7.19a-e	1.1a-b	14.73d-i	4.67b-e	60.5e-j	14.93a-d	32.7a-f
F2(P9XP8)	3.97d-g	1.16a-b	11.1j	3.93i-j	53.87i-m	12.53d-f	24.77h-i
F3(P2P1XP4P3)	8.25a-b	1.16a-b	16.18b-d	4.74a-e	63.17d-h	15.27a-d	33.6a-e
F3(P9XP8)	3.97d-g	0.91a-b	10.99j	3.95h-j	46.3m-o	13.87c-e	24.67i
F4(P9XP8)	3.76f-g	1.14a-b	10.97j	3.91i-j	45.43n-o	12.53d-f	25.67g-i
P1C20	7.49a-c	1.16a-b	14.65e-i	4.46e-i	62.57e-h	14.03c-e	29.9d-g
P2C20	7.05a-f	1.2a-b	15.92b-f	4.27e-j	74.27b-c	10.8f	30.23d-g
P3C20	9.1a-b	1.28a-b	17.27a-b	4.62b-e	59.7e-k	15.4a-c	36.83 ^a
P4C20	7.48a-c	1.18a-b	15.73c-f	4.58c-f	61.77e-i	13.77c-e	32.93a-e
P5C20	6.37a-g	1.28a-b	14.13h-i	4.24f-j	52.2j-n	14.07c-e	31.63b-f
P6C20	7.21a-d	1.35a-b	13.61i	4.51d-g	61.13e-i	14.53b-e	27.93f-i
P7C19	9.13a-b	1.42a	14.57f-i	4.49e-h	47.57l-o	15.8a-c	34a-e
P8C20	3.81e-g	1.31a-b	11.72j	3.82j	40.43o	14.87a-d	25.63g-i
P9C19	3.62g	0.95a-b	10.57j	3.96h-j	57.9f-k	11f	24.5i
CSJTEZONTLA	5.85b-g	0.82b	14.93d-i	5.05a-d	89.4a	14.13c-e	32.6a-f
COM. XOLACHE	6.77a-g	1.08a-b	14.96c-i	5.07a-c	68.03c-e	17.4a	29.57e-h
H-PROMESA	9.31a	1.17a-b	14.2g-i	5.17a-b	67.7c-e	17.07a-b	30.73c-f
H-SJOSECITO	9.71a	1.08a-b	18.02a	5.26a	79.37b	15.97a-c	35.93a-b
DHS _(0.05)	3.39	0.55	1.53	0.55	8.37	2.73	4.83

Medias con letras iguales dentro de la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); GEN: Genotipo; IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera; DHS: Diferencia honesta significativa.

Anexo 1.5 Comparación de medias del rendimiento y de sus componentes para poblaciones de maíz y sus cruzas interraciales en un tercer ambiente de evaluación “San Martín, Chapingo”.

GEN	REN (t ha ⁻¹)	IP (número)	LM (cm)	DM (cm)	PDG (g)	NHM (número)	NGH (número)
F1(P2P1XP4P3)	11.47a-d	1.68a-b	16.06b-d	4.58d-g	66.5c-d	14.4e-i	34.46a-d
F1(P5P7XP6P7)	9.43a-h	1.42a-b	15.01b-f	4.70c-e	63.2c-f	15.06b-g	32.83a-g
F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6)	7.87b-h	1.36a-b	14.85c-g	4.56d-g	60.23d-g	14.66d-i	31.43b-g
F1P1XP3	10.49a-f	1.40a-b	16.4a-c	4.92a-e	63.53c-e	16.86a-b	37.10a
F1P2XP1	14.08a-b	1.85a-b	15.06b-f	4.82b-e	59.26d-g	16.2a-e	36.43a-b
F1P4XP1	11.55a-d	1.59a-b	15.52b-e	4.56d-g	74.16b	14.26e-i	35.56a-c
F1P4XP3	11.76a-d	1.59a-b	16.46a-b	5.00a-d	63.86c-e	16.46a-d	36.33a-b
F1P6XP5	11.07a-f	1.96a	14.97b-f	4.48e-h	62.40c-g	14.43e-i	33.43a-f
F1P7XP5	10.32a-g	1.46a-b	15.72b-e	4.61d-f	60.60 d-g	15.00b-h	34.43a-d
F1P7XP6	12.17a-c	1.64a-b	15.64b-e	4.7c-e	58.1e-g	14.60d-i	34.4a-d
F1P9XP8	5.66d-h	1.33a-b	11.64i-j	4.13g-i	60.63d-g	12.86i-k	24.16h-k
F2(P2P1XP4P3)	11.25a-e	1.65a-b	16.28b-c	4.53d-g	65.3c-e	15.06b-g	34.4a-d
F2(P5P7XP6P7)	10.02a-g	1.77a-b	15.93b-e	4.55d-g	65.36c-e	14.73c-i	31.73a-g
F2P9XP8	5.05e-h	1.42a-b	10.3j-k	3.93i	54.13g-h	12.86i-k	22.13j-k
F3(P2P1XP4P3)	11.73a-d	1.79a-b	15.47b-e	4.66d-e	69.46b-c	14.4e-i	34.13a-d
F3P9XP8	4.83f-g	1.51a-b	10.17j-k	3.85i	49.33h-i	13.13g-k	22.2i-k
F4P9XP8	4.15g-h	1.28a-b	10.08j-k	3.78i	47.86h-i	13.00h-k	21.83k
P1C20	11.08a-f	2.19a	14.60d-h	4.54d-g	64.33c-e	15.53f-j	32.83a-g
P2C20	11.24a-e	1.89a-b	14.93b-f	4.50e-h	83.36a	12.2j-k	27.50g-j
P3C20	10.99a-f	1.61a-b	15.69b-e	4.58d-g	60.93d-g	15.53a-f	32.36a-g
P4C20	9.57a-h	1.52a-b	15.27b-f	4.56d-g	67.16c-d	15.06b-g	32.76a-g
P5C20	7.11c-h	1.58a-b	13.08h-i	4.18f-h	54.9 f-h	14.73c-i	28.4e-h
P6C20	10.04a-g	1.88a-b	13.75f-h	4.58d-g	64.66c-e	13.86f-j	27.83f-i
P7C19	14.27a	1.83a-b	13.31g-h	4.7c-e	54.8g-h	15.33a-f	32.56a-g
P8C20	4.91f-g	1.49a-b	10.94j-k	3.74i	45.26i	13.73f-j	23.26h-k
P9C19	3.45h	0.98b	9.97k	4.03h-i	65.16c-e	11.26k	20.9k
CSJTEZONTLA	10.93a-f	1.42a-b	14.62d-h	5.15a-c	91.06a	13.73f-j	31.96a-g
COM. XOLACHE	11.97a-d	1.72a-b	14.36e-h	4.98a-d	65.06c-e	17.13a	29.83d-g
H-PROMESA	14.2a	1.63a-b	15.36b-e	5.3a	84.9a	16.73a-c	30.53c-g
H-SJOSECITO	13.70a-b	1.50a-b	17.93a	5.18a-b	84.13a	15.53a-f	33.8a-e
DSH _(0.05)	6.31	0.96	1.57	0.47	8.32	2.02	5.64

Medias con letras iguales dentro de la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); GEN: Genotipo; IP: índice de prolificidad; REN: rendimiento de mazorca; LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; PDG: peso de 200 granos; NHM: número de hilera por mazorca; NGH: número de granos por hilera; DHS: Diferencia honesta significativa.

CAPÍTULO II: VARIABILIDAD MORFOLÓGICA Y CAMBIOS ADAPTATIVOS EN MAÍZ EXÓTICO SELECCIONADO EN VALLES ALTOS

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) exótico introducido a una región agrícola de interés, en su proceso de adaptación, presenta cambios adaptativos que podrían ser empleados *per se* o en el mejoramiento genético de poblaciones locales. El germoplasma exótico tropical y subtropical de México presenta caracteres que podrían ampliar la base genética del germoplasma de Valles Altos, para obtener variedades productivas con características que toleren sus principales problemas en esta región. El objetivo de este trabajo fue evaluar cambios adaptativos en poblaciones de maíz exótico adaptadas por selección a Valles Altos, así como la variabilidad genética de las mismas y de algunas de sus cruzas. Se evaluaron nueve poblaciones originales de maíz exótico y ciclos de selección avanzados de estas poblaciones, ocho de sus cruzas simples, dos cruzas dobles, una cruz triple, generaciones avanzadas de las cruzas y cuatro testigos. Los genotipos se evaluaron en tres ambientes bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, donde la unidad experimental constó de dos surcos de seis metros separados a 0.80 m y 50 cm de separación entre matas; se registraron 28 caracteres cualitativos y cuantitativos. Los análisis de componentes principales, agrupamiento jerárquico y análisis discriminante permitieron identificar seis grupos con características sobresalientes en caracteres de rendimiento, precocidad, estructura morfológica y características de mazorca. Las poblaciones originales, mostraron poca o nula adaptación a Valles Altos al incrementar su altura y días a floración, y disminuir su rendimiento. Sin embargo, la selección aplicada en estas poblaciones permitió obtener poblaciones con mayor rendimiento de mazorca, menos días a floración, altura de planta y número de ramas primarias de espiga, y mazorcas de forma cónica. Estos atributos podrían incorporarse en programas de mejoramiento genético de Valles Altos.

Palabras clave: *Zea mays* L., adaptación, caracterización morfológica, poblaciones exóticas, diversidad genética, mejoramiento genético, selección.

ABSTRACT

Exotic maize (*Zea mays* L.) introduced to an agricultural region of interest, in their process of adaptation, has adaptive changes that could be used *per se* and for the genetic improvement of local populations. Exotic tropical and subtropical germplasms of Mexico have characters that could expand the genetic base of the germplasm of High Valleys, for productive varieties with characteristics that tolerate their main problems in this region. The objective of this study was to evaluate adaptive changes in populations of exotic maize adapted through selection to high valleys, as well as their genetic variability and that of their crosses. We evaluated nine original populations of exotic maize and advanced selection cycles of them, eight of its single crosses, a double cross, a three line cross, and advanced generations of crosses and four controls. Genotypes were evaluated in three environments in a randomized complete block design with three replications, and plots of two rows of 6 m and 0.80 m apart and 50 cm separation between hills. We recorded 28 qualitative and quantitative traits. Principal components, hierarchical clustering and discriminant analyses identified six groups with outstanding features in performance characters, earliness, morphological structure and ear characteristics. The original populations showed little or no adaptation to High Valleys as they increased plant height, and days to flowering, but decreased grain yield; however, selection allowed to obtain populations with better yield components, fewer days to flowering, lower plant height, fewer tassel primary stem branches, and cone-shaped ears. These characteristics could be used in maize breeding of high valleys.

Key words: *Zea mays* L., adaptation, morphological characterization, exotic populations, genetic diversity, genetic improvement, selection.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético tradicional emplea la variabilidad genética existente dentro de las especies como fuente principal para el desarrollo de variedades mejoradas que se ajusten a las necesidades de los productores y consumidores en una determinada región agrícola (Moose y Muhm, 2008; Varshney *et al.*, 2009).

En México, el maíz (*Zea mays* L.) posee variabilidad genética amplia. Esta se encuentra en las 59 razas y más de 100 sub razas distribuidas en todo el territorio mexicano (Welhausen *et al.*, 1952; Kato *et al.*, 2009). Sin embargo, en general, en el mejoramiento genético de este cultivo solo se emplea una parte mínima de la diversidad existente (Goodman, 1999). Esto sugiere la necesidad de evaluar la diversidad existente entre y dentro de las razas de maíz que no se utilizan en el mejoramiento genético, y así desarrollar estrategias que permitan su uso en la formación de nuevas variedades para hacer frente exitosamente a los efectos del cambio climático (Hallauer y Carena, 2009; Adeolu *et al.*, 2015).

En este sentido, ya se han realizado caracterizaciones de diferentes razas de maíz y se ha evaluado su diversidad genética para conocer su potencial y utilidad en el mejoramiento genético. Por ejemplo, Yong *et al.* (2013) evaluaron el comportamiento de poblaciones exóticas de maíz y encontraron que los efectos genéticos aditivos son superiores a los efectos no aditivos y que estas tienen alelos favorables para tolerancia al acame y potencial de rendimiento. López-Romero *et al.* (2005) evaluaron la diversidad de 118 poblaciones de Zapalote Chico, Vandeño, Tepecintle y Tuxpeño, y encontraron un patrón evolutivo diferente para Zapalote Chico comparado con el resto de razas evaluadas. López-Morales *et al.* (2014) evaluaron poblaciones de maíz nativo del trópico húmedo de Puebla, México, en las cuales encontraron diversidad genética amplia para características fenotípicas como espiga, mazorca y grano.

Marker y Krupakar (2009) evaluaron 16 genotipos de maíz exótico y concluyeron que la variabilidad genética del germoplasma exótico es favorable para mejorar el rendimiento de maíz. De manera similar, Goodman (2005) señaló que el germoplasma de maíz exótico tropical es una fuente de resistencia al acame y precocidad a madurez; asimismo, indicó que es posible obtener rendimientos superiores a partir de germoplasma exótico adaptado, a ambientes de interés.

Los ejemplos antes mencionados son muestra del potencial que tiene el maíz exótico para ser empleado como fuente de alelos para el mejoramiento genético. No obstante, el germoplasma exótico, incorporado a una región determinada, necesita un proceso de adaptación a su nuevo

ambiente. En este proceso de adaptación estas poblaciones sufren cambios morfológicos (Gouesnard *et al.*, 1996; Hallauer y Carena, 2009). Así, Lewis y Goodman (2003) demostraron que el germoplasma tropical de maíz se puede emplear para mejorar el germoplasma de clima templado mediante el método de mejoramiento de pedigree y, así derivar líneas con desempeño agronómico superior. De manera similar, Pérez-López *et al.* (2014) y Buenrostro-Robles *et al.* (2017) identificaron líneas derivadas de germoplasma exótico como una opción viable para la formación de híbridos de cruza simples con alto potencial productivo y de menor costo. Asimismo, Pérez *et al.* (2002) mencionan que la selección masal visual es efectiva para adaptar razas de origen tropical y subtropical a condiciones de clima templado.

Para el caso de Valles Altos, el mejoramiento genético se enfoca principalmente en el uso de materiales élite derivados de la raza Chalqueño y Cónico (Pérez, 2002). Sin embargo, debido a las bondades que ofrece el germoplasma exótico para el mejoramiento de maíz en la Mesa Central, en Montecillo, Texcoco, se ha realizado adaptación de poblaciones de maíz originales del trópico y subtropical por más de 20 ciclos de selección bajo condiciones de Valles Altos (Pérez *et al.*, 2002). El objetivo de este trabajo fue evaluar cambios adaptativos en poblaciones de maíz exótico adaptadas a Valles Altos, así como la variabilidad genética de las mismas y de sus cruza, e identificar los caracteres de mayor variación para describir las poblaciones estudiadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal

El material vegetal consistió de nueve poblaciones originales proporcionadas por el banco de germoplasma del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y las poblaciones que resultaron después de 19 o 20 ciclos de selección masal: 1) Pepitilla (P1C20), Tabloncillo (P2C20), Comiteco (P3C20), Celaya (P4C20), Vandeño (P5C20), Tepecintle (P6C20), y Nal-Tel (P8C20) con 20 ciclos de selección masal; y 2) Tuxpeño (P7C19) y Zapalote Chico (P9C19) con 19 ciclos de selección masal.

También se evaluaron ocho cruza simples formadas entre las poblaciones adaptadas: F1(P1XP3), F1(P2XP1), F1(P4XP1), F1(P4XP3), F1(P7XP5), F1(P6XP5), F1(P7XP6), F1(P9XP8); dos cruza dobles: F1(P2P1XP4P3) y F1(P5P7XP6P7); una cruza triple: F1[(P5P7XP6P7)]X(P5P6); tres generaciones F2: F2(P9XP8), F2(P2P1XP4P3) y F2(P5P7XP6P7); dos generaciones F3: F3(P9XP8) y F3(P2P1XP4P3); una generación F4: F4(P9XP8); y como testigos se emplearon dos híbridos comerciales: Promesa (TPR) y San Josecito

(TSJ), y dos variedades locales: Criollo de San Juan Tezontla (TCSTEZ) y Compuesto Xolache (TCXO).

Ubicación

Los 39 genotipos se evaluaron en tres ambientes: en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo en Montecillo, Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2250 msnm, se establecieron dos experimentos de evaluación. Estos se consideraron ambientes diferentes debido a que las características edáficas de los dos lotes fueron contrastantes; además, cada experimento fue sembrado en fecha diferente. El tercer ambiente fue el Campo Agrícola Experimental “San Martín” de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2250 msnm.

Manejo agronómico

En los tres ambientes, la preparación del terreno consistió en un barbecho, un paso de rastra y surcado. La siembra se realizó el 17 y 23 de mayo de 2017 en los ambientes de Montecillo, y el 25 de mayo de 2017 en el ambiente de Chapingo. En los tres ambientes se sembró a una densidad de población de 54,166 plantas/ha. Los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental se formó por dos surcos de seis metros de largo, separados a 80 cm, con 52 plantas. La siembra se hizo de manera manual con pala, depositando dos semillas por sitio cada 50 cm.

La dosis de fertilización aplicada fue 160-80- 00. El P_2O_5 se aplicó todo a la siembra, y el N se aplicó la mitad a la siembra y el resto al aporque (35 días después de la siembra (dds)). Para el control de maleza se aplicó Gesaprim Calibre 90 GDA[®] (1 Kg ha⁻¹) combinado con Primagran[®] Gold (3 L ha⁻¹) siete dds, y a los 60 dds se asperjó una mezcla de Gesaprim Calibre 90 GDA[®] más Gramoxone[®] con un poco de detergente Roma[®] como surfactante.

Caracteres evaluados

Se registraron 28 caracteres agro-morfológicos cuantitativos y cualitativos. Los caracteres cuantitativos fueron: rendimiento de mazorca (REN, t ha⁻¹), peso de 200 granos (PDG, g), altura de planta (AP, m), altura de mazorca (AM, m), días a floración masculina (DFM, días), días a floración femenina (DFF, días), número total de hojas (TH), número de hojas arriba de la mazorca (NHAM), largo de la hoja de la mazorca (LHM, cm), ancho de la hoja de la mazorca (AHM, cm), diámetro superior de mazorca (DSM, cm), diámetro basal de mazorca (DBM, cm), diámetro de tallo (DT, mm), número total de macollos (TM), longitud de la espiga (LTE, cm), número de ramas

primarias de la espiga (NRP), longitud de la rama central de la espiga (LRC, cm), índice de conicidad de la mazorca (IC, %), longitud de mazorca (LM, cm).

Las variables cualitativas fueron: color de la planta (CP), pilosidad de la planta (PP), aspecto de la planta (ASP), aspecto de mazorca (ASM), acame (AC), sanidad de la planta (SP), sanidad de mazorca (SM), uniformidad de la planta (UP) y uniformidad de mazorca (UM). Para determinar el REN, se obtuvo el rendimiento de mazorca por planta (RMP) al dividir el peso seco a humedad constante del total de mazorcas de la parcela entre el número de plantas cosechadas con competencia completa en la parcela; este valor se multiplicó por la densidad de plantas por hectárea (54,166).

Las variables AP, AM, TH, NHAM, LHM, AHM, DSM, DBM, DT y TM se midieron en una muestra de diez plantas con competencia completa por parcela. Los caracteres LRC, LTE y NRP se midieron en una muestra de 10 espigas por unidad experimental. Las características DFM, DFF, CP, PP, ASP, ASM, AC, SP, SM, UP y UM se midieron por unidad experimental. Para el caso de DFM y DFF, se consideró como floración cuando el 50 % de las plantas de la unidad experimental estaban en anthesis y estigmas expuestos, respectivamente.

El IC y LM se midieron en una muestra de diez mazorcas por unidad experimental. El IC se calculó mediante la fórmula propuesta por Ordaz y De Ron (1988): $IC = \frac{(di-ds)/2}{l/3} * 100$ donde: di = diámetro inferior de mazorca; ds = diámetro superior de mazorca; l = longitud de mazorca. Las variables AP, AM, LHM, AHM, LTE, LRC y LM se midieron con la escala del fléxometro PRO-3MEC, marca PRETUL[®] (originario de China). Para PDG se empleó una balanza digital modelo CS200, de la marca Ohaus[®] (proveniente de México). Las variables DT, DBM, DSM se midieron con un vernier digital milimétrico y estándar TRUPER[®], modelo CALDI-6MP (originario de México).

Para registrar los caracteres cualitativos se empleó una escala de 1-5; para CP la escala fue: 1= verde a 5= morado; en ASP, 1= buen aspecto a 5= peor aspecto; para ASM, 1= buen aspecto de mazorca a 5= peor aspecto de mazorca; en AC, 1= sin presencia de acame a 5= todas las plantas con acame; SP fue, 1= plantas sanas a 5= todas las plantas enfermas; en SM, 1= mazorcas sanas a 5= todas las mazorcas enfermas; para UP, 1= todas las plantas uniformes a 5= alta variabilidad de plantas; en UM, 1= todas las mazorcas uniformes a 5= mazorcas muy variables.

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos, se realizó una matriz de datos morfológicos elaborada con el promedio de los tres ambientes para cada variable. Con la finalidad de identificar la factibilidad de emplear la metodología de análisis de componentes principales, se realizó la prueba de Kaiser (1974) con el paquete psych versión 1.7.8 (Revelle, 2017). Para análisis posteriores se estandarizó la matriz de datos; la matriz estandarizada se usó para el análisis de componentes principales, que permitió eliminar colinealidad estadística y seleccionar las variables de mayor varianza explicativa (Jolliffe, 2002) mediante el paquete stats 3.5.0 (R Core Team, 2017). Las variables de mayor varianza explicativa se seleccionaron con la metodología propuesta por Hair *et al.* (1999); estas variables fueron usadas en análisis subsecuentes.

Se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico a partir de la matriz de distancias euclidianas elevadas al cuadrado generadas con el paquete factoextra 1.0.5 (R Core Team, 2017), y el algoritmo de mínima varianza de Ward (Ward, 1963), con el procedimiento hclust del paquete Stats 3.5.0. Para determinar el número de grupos se empleó el índice de Beale (1969) con un nivel de significancia de 10 % mediante el paquete estadístico Nbclust 3.0 (Charrad *et al.*, 2014). Adicionalmente, se realizó un análisis discriminante para corroborar la pertinencia de la agrupación generada mediante una prueba de resustitución, e identificar los caracteres responsables de la agrupación mediante el paquete MASS 7.3 (Venables y Ripley, 2002). Los paquetes antes mencionados se ejecutaron en el software R 3.4.1. (R Core Team, 2013).

De manera complementaria al análisis de agrupamiento, se realizó un análisis de varianza combinado y comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) entre grupos. Este análisis se realizó con el software SAS® 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

Los análisis antes mencionados fueron realizados únicamente para variables cuantitativas; en cambio, las variables cualitativas solo fueron analizadas mediante la moda de cada grupo, porque no son candidatas a los análisis antes mencionados, y fueron empleadas para describir los grupos de germoplasma generados como lo sugieren Franco e Hidalgo (2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Componentes principales

La prueba de Kaiser indicó un coeficiente de 0.7, el cual indica que la matriz empleada cumple con los requerimientos del análisis de componentes principales.

A partir del análisis de componentes principales, se eligieron los tres primeros componentes con valores propios de 2.51, 1.92 y 1.10, respectivamente, y que explican del 74 % de la variación fenotípica total.

El primer componente explicó el 42 % de la varianza total, mediante la asociación de manera positiva con REN (0.32), LHM (0.31), DSM (0.30) y LM (0.37). El componente dos explicó 24 % de la varianza, y este correlacionó de manera negativa con DFM (-0.402), NHAM (-0.39) y DT (-0.334), y de forma positiva con IC (0.37); en cambio el tercer componente solo explicó el 8 %, mediante la asociación de la característica AP (-0.30) de manera negativa, y NRP (0.70) de manera positiva.

En la Figura 2.1 se observa la distribución de los genotipos en cinco grupos, con base en los tres primeros componentes. El grupo A se integró por los testigos adaptados a Valles Altos; el grupo B se conformó por la F1(P2XP1), F1(P4XP3) y sus generaciones avanzadas de la cruce doble entre ellas; el grupo C se integró por los genotipos adaptados a Valles Altos y sus cruza; el grupo D agrupó las poblaciones sin adaptar de Nal-Tel, Zapalote Chico, Tepecintle, y Vandeño; y el grupo E se integró por las poblaciones Pepitilla, Tabloncillo, Comiteco, Celaya y Tuxpeño sin adaptar a Valles Altos.

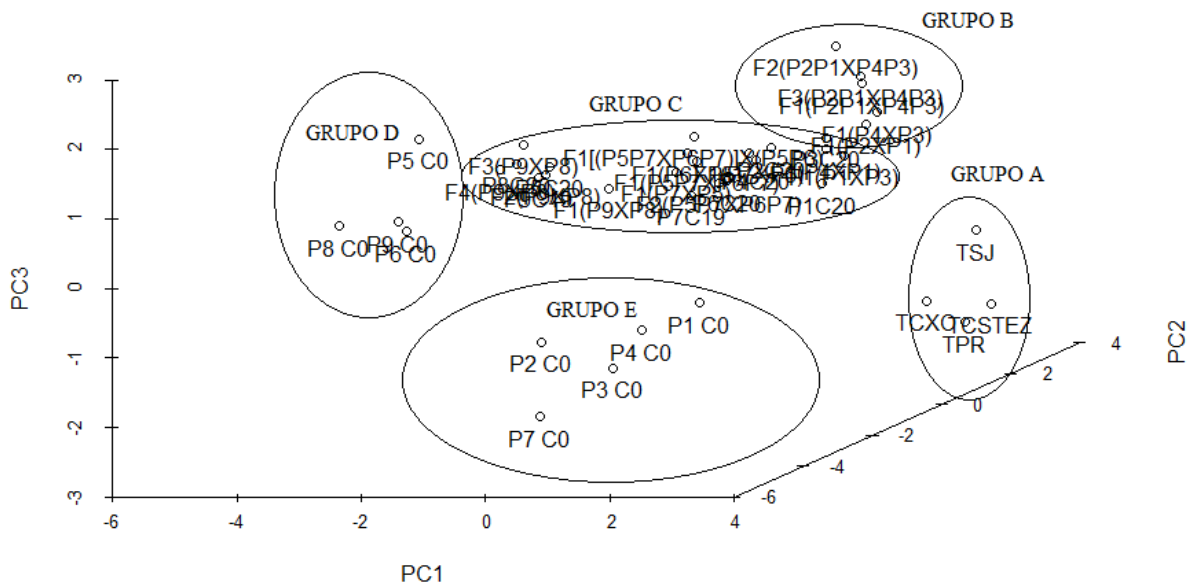


Figura 2.1 Distribución de los genotipos con base en tres componentes principales.

Los genotipos con valores positivos para el CP1 presentaron mayor rendimiento, longitud de hoja de mazorca, diámetro superior de mazorca, y longitud de mazorca; en cambio aquellos con valores negativos presentaron valores inferiores para estas características. Con respecto al CP2, los genotipos que presentaron valores positivos fueron poblaciones con mayor índice de conicidad, menor número de días a floración masculina, menor número de hojas arriba de la mazorca, y menor diámetro de tallo; mientras que los genotipos con valores negativos para este componente presentaron menor índice de conicidad, mayor número de días a floración masculina, mayor número de hojas arriba de la mazorca, y mayor diámetro de tallo. Mientras tanto, para el tercer componente, los genotipos con mayor número de ramas primarias en la espiga y menor altura de planta fueron las poblaciones con valores altos en este componente; en contraste, cuando los genotipos presentaron valores inferiores para este componente, la cantidad de ramas primarias de la espiga disminuyó y la altura de planta aumentó.

El análisis realizado permitió identificar las variables que explican de manera eficiente la variabilidad entre las poblaciones evaluadas, por lo que estas variables podrían ser empleadas en estudios posteriores para evaluar la diversidad entre poblaciones de maíz exótico. De este manera, se observó que las características morfológicas y ciclo biológico de la planta fueron las de mayor importancia para describir la diversidad entre poblaciones; al respecto, Herrera-Cabrera *et al.* (2004), Hortelano *et al.* (2012) y López-Morales *et al.* (2014) sugirieron que estas características son las de mayor importancia para explicar la variación morfológica entre poblaciones de maíz.

Análisis de agrupamiento

Con base en el análisis de agrupamiento (Figura 2.2), realizado con las diez variables seleccionadas y el índice de Beale (1969), se determinaron seis grupos de genotipos, lo que concordó con los resultados de Marker y Krupakar (2009) y López-Morales *et al.* (2014), quienes en trabajos similares determinaron cinco y seis grupos, respectivamente, para maíz exótico del trópico húmedo, con base en caracteres vegetativos, fenológicos, de espiga, de mazorca y de grano.

El análisis discriminante permitió identificar que las variables altura de planta, número de ramas primarias de espiga, número de hojas arriba de la mazorca y longitud de mazorca presentaron capacidad de separación del 93 %, siendo así las de mayor importancia para generar el patrón de agrupamiento identificado mediante el algoritmo de Ward. Asimismo, la prueba de resustitución realizada con las funciones lineales discriminantes (Johnson, 1998), identificó una tasa de error

igual a cero; esto sugirió que el agrupamiento generado mediante el algoritmo de Ward fue el correcto porque integró de manera adecuada los genotipos en los grupos identificados.

Para describir los grupos identificados, se realizó una comparación de medias para las diez variables de mayor varianza explicativa seleccionadas mediante el análisis de componentes principales (Cuadro 2.1).

El grupo I se formó con las poblaciones adaptadas de Zapalote Chico y Nal-Tel, y sus cruizas avanzadas. Este se caracterizó por presentar plantas de porte menor (1.87 m), con tallos delgados (22.65 mm) y floración masculina precoz (70.93 días), longitud pequeña de la hoja de la mazorca (81.73 cm), pocas hojas arriba de la mazorca (4.8 hojas), número intermedio de ramas primarias de espiga (18.87 ramas), rendimiento de mazorca menor (4.35 t ha⁻¹), diámetro superior de mazorca intermedio (3.48 cm), índice de conicidad de 7.06 %, y mazorcas de longitud menor (11.04 cm).

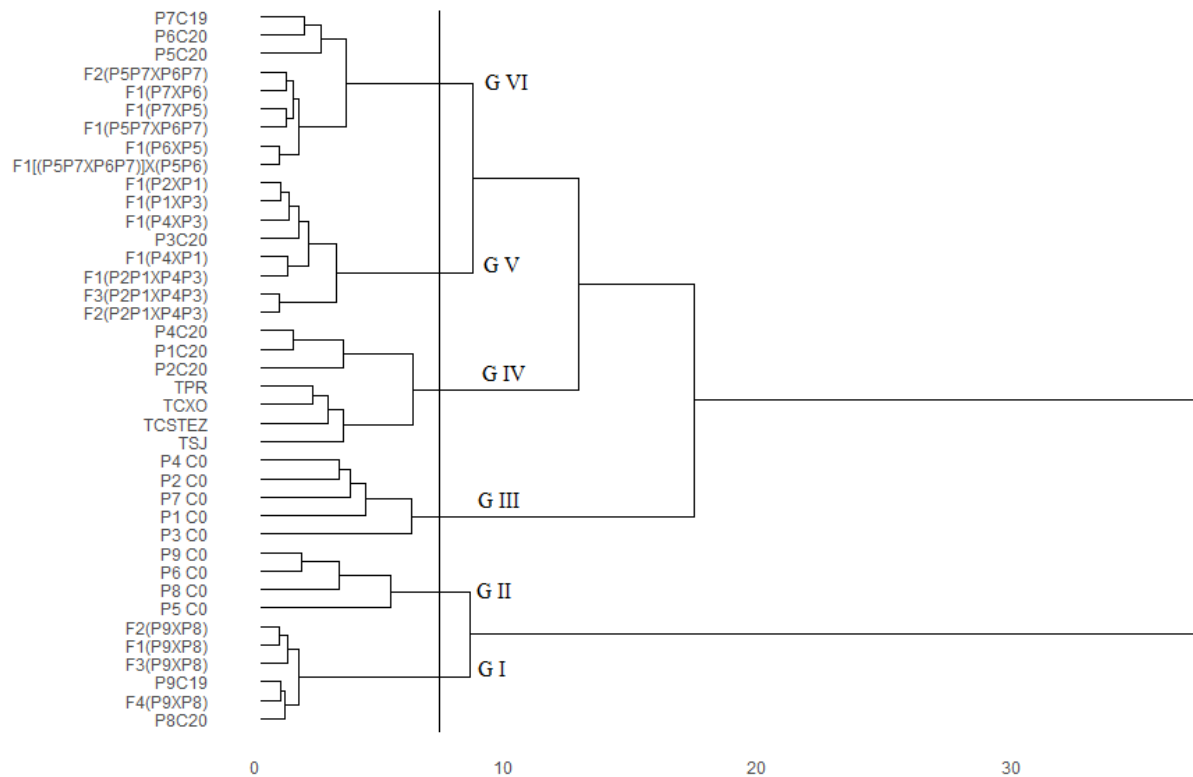


Figura 2.2 Dendrograma jerárquico obtenido mediante distancias Euclidianas de diez caracteres morfológicos de mayor correlación en el análisis de componentes principales.

Cuadro 2.1. Comparación de medias de diez los caracteres de mayor varianza explicativa entre seis grupos de germoplasma exótico evaluado en Valles Altos.

CARACTER	GRUPOS						
	I	II	III	IV	V	VI	DHS
REN (t ha ⁻¹)	4.35b	2.29b	3.95b	9.33a	9.93a	9a	2.45
DFM (días)	70.93c	83.75b	105a	81.56bc	87b	92.47ab	12.62
AP (cm)	1.87d	2.17c	2.94a	2.33bc	2.47b	2.31bc	0.29
LHM (cm)	81.73c	86.22bc	99.38a	93.59ab	100.71a	93.52ab	9.82
NHAM (número)	4.8b	5.85a	5.88a	5.09ab	5.37ab	5.92a	0.88
DT (mm)	22.65c	24.03c	30.97a	26.88b	27.77b	28.44ab	2.76
NRP (número)	18.87ab	20.63ab	21.2a	14.16b	24.32a	23.34a	6.71
DSM (mm)	3.48bc	3.19c	4.06a	4.06a	3.84ab	3.92a	0.43
IC (%)	7.06ab	6.24bc	4.81c	8.18a	8.18a	6.79ab	1.56
LM (cm)	11.04c	9.76c	13.64b	15.21ab	15.82a	14.55ab	1.80

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); DHS: diferencia honesta significativa; REN: rendimiento; DFM: días a floración masculina; AP: altura de planta; LHM: longitud de hoja de mazorca; NHAM: número de hojas arriba de la mazorca; DT: diámetro de tallo; NRP: número de ramas primarias de la espiga; DSM: diámetro superior de mazorca; IC: índice de conicidad; LM: longitud de mazorca.

En el grupo II se encontró las poblaciones Nal-Tel, Zapalote Chico, Vandeño y Tepecintle, todas del ciclo cero. Esta manera de agrupación se explica con la teoría propuesta por Wellhausen *et al.* (1952) quienes indicaron que la población Tepecintle dio origen a la población Vandeño y Zapalote Chico, lo cual explicaría, la presencia de características similares en estas poblaciones. Este grupo se caracterizó por presentar plantas de altura intermedia (2.17 m.), tallos delgados (24.03 mm), 83.75 días a floración masculina, 5.85 hojas arriba de la mazorca, hoja de la mazorca pequeñas (86.22 cm), ramas primarias de espigas intermedias (20.63), un rendimiento de 2.29 t ha⁻¹, 3.19 cm de diámetro superior de mazorca, un índice de conicidad de 6.24 % y, de manera similar al grupo I, las mazorcas fueron de longitud menor (9.76 cm).

El grupo III lo integraron las poblaciones sin adaptar de Pepitilla, Tabloncillo, Comiteco, Celaya y Tuxpeño. Se caracterizó por presentar plantas altas (2.94 m), tallos gruesos (30.97 mm), plantas tardías a floración masculina (105 días), la hoja de mazorca fue larga (99.38 cm), presentaron

mayor número de hojas arriba de mazorca (5.88 hojas), las espigas fueron las de mayor número de ramas primarias (21.2 ramas), rendimiento bajo (3.95 t ha^{-1}), 4.06 cm de diámetro superior de mazorca, menor índice de conicidad (4.81 %), lo cual significó que las mazorcas sin adaptar presentaron características de mazorca aún cilíndricas (Wellhausen *et al.*, 1952; Wen *et al.*, 2012) y longitud de mazorca intermedia (13.64 cm).

El grupo IV se formó por los testigos locales pertenecientes a la raza Chalqueño y las poblaciones Pepitilla, Tabloncillo y Celaya, adaptadas a Valles Altos. Las plantas de este grupo se caracterizaron por presentar plantas de altura intermedia (2.33 m), grosor de tallo intermedio (26.88 mm), con 81.56 días a floración masculina, con longitud de hoja intermedia (93.59 cm), 5.09 hojas arriba de la mazorca, espigas con el menor número de ramas primarias (14.1 ramas), presentaron rendimiento superior (9.33 t ha^{-1}) comparado con los tres primeros grupos, su diámetro de mazorca fue de 4.06 cm.

Las mazorcas del grupo IV presentaron el mayor índice de conicidad (8.18 %); es decir, las mazorcas en estas poblaciones tendieron a ser más cónicas, característica que identifica a las razas del Altiplano Central (Wellhausen *et al.*, 1952; Herrera-Cabrera *et al.*, 2004). Por esto, se infiere que en las poblaciones Tabloncillo y Celaya, al ser adaptadas a la región de Valles Altos, su forma de mazorca pasó de ser cilíndrica a cónica. Con respecto a la longitud de mazorca, este grupo se caracterizó por tener mazorcas que promediaron 15.82 cm. En relación con el número de ramas de la espiga, Pepitilla, Tabloncillo y Celaya, con 20 ciclos de selección para adaptación a Valles Altos, presentaron pocas ramas primarias, lo que les permitió agruparse con los testigos adaptados locales, que tienen pocas ramas (Sánchez y Goodman, 1992; Kato *et al.*, 2009).

El grupo V quedó conformado por la población adaptada de Comiteco y las cruces donde esta participó como progenitora; asimismo, se integraron las cruces F1 (P2XP1), F1 (P4XP1). Este grupo se identificó por presentar plantas de altura intermedia (2.47 m), grosor de tallo intermedio (27.77 mm), 87 días a floración masculina, hojas de mazorca largas (100.71 cm), con 5.37 hojas arriba de la mazorca, las espigas presentaron 24.32 ramas primarias, con rendimiento de mazorca de 9.93 t ha^{-1} , las mazorcas presentaron diámetro superior de mazorca intermedio (3.84 cm), su índice de conicidad fue igual que el del grupo IV (8.18 %) y las mazorcas fueron largas (15.82 cm).

El grupo VI incluyó los ciclos avanzados de las poblaciones Tuxpeño, Tepecintle y Vandeano, así como las respectivas cruces entre estas poblaciones. Estas poblaciones presentaron altura de planta intermedia (2.31 m), grosor de tallo intermedio (28.44 mm), 92.47 días a floración

masculina, longitud de la hoja de mazorca intermedia (93.52 cm), presentaron 5.92 hojas arriba de la mazorca, las espigas presentaron el mayor número de ramas primarias (23.34 ramas), y un rendimiento significativamente superior comparado con los tres primeros grupos (9 t ha⁻¹), el diámetro superior de mazorca fue de 3.92 cm, 6.79 % de índice de conicidad y las mazorcas fueron de longitud intermedia (15.55 cm).

El patrón de agrupación de los materiales permite indicar que las poblaciones tropicales sufrieron cambios morfológicos durante su proceso de adaptación a Valles Altos. Esto se reflejó en la variabilidad genética y morfológica mayor para los caracteres de rendimiento, días a floración, altura de planta, número de hojas arriba de la mazorca, longitud de la hoja de mazorca, diámetro de tallo, número de ramas primarias de la espiga, y para mazorca los caracteres de diámetro superior, longitud e índice de conicidad, los cuales presentaron mayor diferencia significativa entre grupos. Con respecto al potencial de uso del germoplasma evaluado, el grupo I podría ser empleado para ampliar la variabilidad en días a floración, porque los genotipos de mazorca pequeña y menor número de días a floración como Nal-Tel y Zapalote Chico, y sus cruzas se separaron del resto de las razas con mazorca grande y mayor número de días a floración. De manera similar, López-Romero *et al.* (2005) observaron el mismo patrón de agrupamiento con base en el tamaño de grano y precocidad. Asimismo, la precocidad indica que los materiales señalados tienen alelos favorables para hacer frente a problemas como estación de crecimiento limitada por sequías y heladas, como lo sugieren Hortelano *et al.* (2012).

De manera similar, un carácter importante a mejorar para el maíz de Valles Altos es la altura de planta, debido al problema de acame que presentan las variedades locales (Wellhausen *et al.*, 1952; González *et al.*, 2007). En este sentido, una opción para combatir este problema es reducir la altura de planta mediante el uso de materiales de porte bajo, como los del grupo I, ya sea que estos aporten alelos a las variedades locales o que puedan usarse *per se* por los productores.

Un componente importante para el rendimiento de maíz es la longitud de mazorca (LM) (Usha *et al.*, 2017). En este estudio se observó que la introducción de poblaciones exóticas a Valles Altos permitiría ampliar la variabilidad genética para este carácter, como es el caso de los materiales del grupo V, porque presentaron LM superior, respecto a los demás grupos.

En las poblaciones adaptadas se observó la reducción en los días a floración masculina comparadas con las poblaciones no adaptadas, esto sugiere que la selección por más de 20 ciclos permitió obtener precocidad a floración. De manera similar, Pérez *et al.* (2002) al evaluar las

mismas razas originales y tres compuestos de selección masal (C3, C6 y C9) en condiciones de Valles Altos, encontraron que los días a floración masculina disminuyeron en la mayoría de las razas, excepto en las poblaciones Tepecintle y Zapalote Chico.

Por la divergencia observada entre grupos, se sugiere que las poblaciones adaptadas de los grupos I, IV y VI podrían ser empleadas en la formación de híbridos, lo cual podría generar una ganancia en la heterosis observada para las características de interés (Mickelson *et al.*, 2001). De manera similar, Marker y Krupakar (2009) indican que al emplear maíz exótico con mayor grado de divergencia entre genotipos fue posible ampliar la base genética para el mejoramiento genético de maíz para una región de interés, y se obtuvo mayor heterosis en los caracteres de interés.

Las poblaciones tropicales y subtropicales originales de maíz cultivadas en condiciones templadas de Valles Altos presentaron mayor altura, mayor longitud de hoja de mazorca, más días a floración masculina, y menor rendimiento de grano. Esto concuerda con lo mencionado por Hallauer y Carena (2009) en el sentido de que las poblaciones tropicales al ser cultivadas en ambientes templados presentan porte alto, hojas y espigas más grandes, ciclo de crecimiento más amplio debido al fotoperiodo y menor rendimiento de grano. Por otro lado, se observó que al seleccionar las poblaciones por varios ciclos en las condiciones edafoclimáticas propias de Valles Altos, las plantas disminuyeron su altura, tuvieron menor número de ramas primarias de espiga, y aumentaron su rendimiento; además, las mazorcas de las poblaciones y sus cruzas adaptadas a Valles Altos presentaron mazorcas con mayor índice de conicidad comparado con las poblaciones sin adaptar a Valles Altos. Lo anterior concuerda con lo reportado por Pérez *et al.* (2000), quienes encontraron que la selección masal aplicada por 12 ciclos de selección visual en Valles Altos a la población Tuxpeño produjo incrementos en sus componentes de rendimiento y redujo significativamente los días a floración masculina, número de hojas arriba de la mazorca, número de ramas primarias de la espiga, y aumentó la conicidad de las mazorcas.

Evaluación visual de aspecto de planta y mazorca

De acuerdo con los resultados de los caracteres cualitativos obtenidos por parcela, el grupo IV presentó una variación de color de tallo de verde ligero y pilosidad intermedia a color morado y pilosidad abundante, donde la población Pepitilla (P1C20), subtropical, fue de color verde ligero y la población criollo de San Juan Tezontla (TCSTEZ), Chalqueño local, fue morada y pilosidad

abundante. Esto concordó con lo reportado por Sánchez y Goodman (1992), quienes mencionaron que las razas del grupo cónico tienen hojas muy pubescentes con presencia de antocianinas.

Los grupos V y VI presentaron la mejor calificación para aspecto de planta. Las poblaciones exóticas adaptadas P3C20, P5C20, P6C20, P7C19 y sus cruces fueron las de mejor aspecto de planta para Valles Altos. Respecto a uniformidad de planta, los genotipos presentaron uniformidad buena, excepto el grupo II que presentó uniformidad intermedia, por lo que se infiere que la selección masal propició uniformidad dentro de poblaciones.

Los grupos en general no presentaron acame de planta, pero un caso particular fue el testigo local TCSTEZ, de la raza Chalqueño, que sí lo mostró. Lo anterior sugirió que las poblaciones de maíz exótico tropical evaluadas permitirían ampliar la variabilidad genética para contrarrestar el problema de acame, que es muy frecuente en las variedades de Valles Altos (González *et al.*, 2007). Las poblaciones del grupo III, IV y V presentaron buen comportamiento para sanidad de planta. Todos los grupos mostraron aspecto de mazorca aceptable, con excepción de los grupos I y II.

En cuanto a sanidad de mazorca, los grupos I, II, y IV presentaron sanidad buena. En particular, las poblaciones Nal-Tel y Zapalote Chico exhibieron resistencia a enfermedades. Lo cual concuerda con lo encontrado por Widstrom *et al.* (2003). Estos autores mencionaron que las poblaciones Nal-Tel y Zapalote Chico tienen alelos favorables para tolerancia a plagas y enfermedades de mazorca.

CONCLUSIONES

Las poblaciones tropicales y subtropicales introducidas y adaptadas por selección a Valles Altos presentaron diversidad genética amplia para caracteres de rendimiento, precocidad, estructura morfológica y características de mazorca, la cual podría aprovecharse e incorporarse en programas de mejoramiento genético de maíz de la Mesa Central.

Las poblaciones tropicales y subtropicales originales evaluadas en las condiciones templadas de Valles Altos mostraron inadaptación, ya que se incrementó su altura, sus días a floración y disminuyó su rendimiento; sin embargo, la selección aplicada a estas poblaciones permitió obtener poblaciones con mayor rendimiento de mazorca, menor cantidad de días floración, menor altura de planta, menor número de ramas primarias de espiga y mazorcas de forma cónica.

Las poblaciones P1C20, P2C20 y P4C20 podrían ser utilizadas *per se* como variedades para Valles Altos, porque sus rendimientos y características morfológicas fueron similares a los de los testigos locales utilizados.

Los caracteres que tuvieron mayor variación y permitieron la descripción de los maíces tropicales y subtropicales adaptados a Valles Altos de México fueron: rendimiento, días a floración masculina, altura de planta, longitud de hoja de mazorca, número de hojas arriba de la mazorca, diámetro de tallo, número de ramas primarias de espiga, diámetro superior de mazorca, índice de conicidad y longitud de mazorca.

El análisis discriminante identificó que altura de planta, número de ramas primarias de espiga, número de hojas arriba de la mazorca y longitud de mazorca fueron las variables de mayor importancia para generar el patrón de agrupamiento identificado mediante el algoritmo de Ward.

LITERATURA CITADA

Adeolu A., M., A. Menkir, M. Gedil, E. Blay, V. Gracen, E. Danquah and L. Funmilayo. 2015. Diversity assessment of drought tolerant exotic and adapted maize (*Zea mays* L.) inbred lines with microsatellite markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 18: 147-154.

Beale E. M.L. 1969. *Cluster Analysis*. Scientific Control Systems, London.

Buenrostro-Robles, M., R. Lobato-Ortiz, J.J. García-Zavala, C. Sánchez-Abarca. 2017. Rendimiento de líneas de maíz exótico irradiado con rayos Gamma y de híbridos de cruce simple. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40: 351-358.

Charrad M., N., Ghazzali, V., Boiteau and A., Niknafs. 2014. Nbclust: An R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of statistical software* 61:1-36.

Franco, T. L. e Hidalgo, R. 2003. Análisis Estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos Fitogenéticos. Boletín técnico no. 8, Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI), Cali, Colombia. 89 p.

González H., A., L. M. Vázquez G., J. Sahagún C. J. E. Rodríguez P. y D. de J. Pérez L. 2007. Rendimiento del maíz de temporal y su relación con la pudrición de mazorca. *Agricultura Técnica en México* 33: 33-42.

Goodman, M. M. 2005. Broadening the U. S. maize germplasm base. *Maydica* 50: 203-214

Goodman, M. M. 1999. Broadening the genetic diversity in Maize breeding by use of exotic germplasm. *In: The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops*. J. G. Coors y S. Pandey (eds). ASA, CSSA, Madison, WI, USA. pp: 139- 148.

Gouesnard, B., J. Sanou, A. Panouille, V. Bourriun and A. Boyat. 1996. Evaluation of agronomic traits and analysis of exotic germplasm polymorphism in adapted x exotic maize crosses. *Theoretical and Applied Genetics* 92:368-374.

Hair, J. F., J. R., Anderson, R. E., Tatham, R. L. and W. C. Black. 1999. Análisis multivariante. Quinta edición. Prentice Hall (Ed.) Iberia, Madrid. pp 79-140

Hallauer, A. R., M.J. Carena. 2009. Maize breeding: *In: Cereals*. M.J. Carena (ed) Springer-Verlag New York, USA. pp: 3-98

Herrera-Cabrera, B. E., F. Castillo-González, J. J. Sánchez-González, J. M. Hernández-Casillas, R. A. Ortega-Pazkca y M. Major-Goodman. 2004. Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia* 38:191-206.

Hortelano S. R., R., A. Gil M., A. Santacruz V., H. López S., P. Antonio L. y S. Miranda C. 2012. Diversidad fenotípica de maíces nativos del altiplano centro-oriente del estado de Puebla, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35: 97–109.

Jolliffe I. T. 2002. Principal component analysis. Segunda edición. Springer-Verlag (Ed.). New York. 478 p.

Kato Y., T. A., C. Mapes S., L. M. Mera O., J.A Serratos H., R.A. Bye B. 2009. Origen y diversificación del Maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, DF, 116 p.

Kaiser, H. 1974. An index of factor simplicity. *Psychometrika* 39:31-36.

Lewis, R. S. and M.M. Goodman. 2003. Incorporation of tropical maize germplasm into inbred lines derived from temperate x temperate-adapted tropical line crosses: agronomic and molecular assessment. *Theor Appl Genet* 107:798-805.

López-Morales, F., O.R. Taboada-Gaytán, A. Gil-Muñoz, P. Antonio-López and D. Reyes-López. 2014. Morphological diversity of native maize in the humid tropics of Puebla, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17: 19 -31

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. *Interciencia* 30:284-290

Marker, S. and A. Krupakar. 2009. Genetic divergence in exotic maize germplasm (*Zea mays* L.). *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 4: 44-47

Mickelson, H. R., H. Cordova, K. V. Pixley and M. S. Bjarnason. 2001. Heterotic relationships among nine temperate and subtropical maize population. *Crop Science* 41: 1012-1020.

Moose, S. P. and R. H. Mumm. 2008. Molecular plant breeding as the foundation for 21st century crop improvement. *Plant. Physiol* 147:969-977.

Ordaz, A. and A.M. De Ron. 1988. A method to measure conicalnees in Maize. *Maydica* 33:261-267.

Pérez C., A. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. 2002. Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual. Rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:435-441.

Pérez C., A. A., J.D. Molina G y A. Martínez G.2000. Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia*. 34: 533-542.

Pérez-López, F. J., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, J.D. Molina-Galán, J. de J. López-Rey noso, T. Cervantes-Santana. 2014. Líneas homocigóticas de maíz de alto rendimiento como progenitoras progenitoras de híbridos de cruza simple. *Agrociencia* 48: 425-437.

R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Revelle, W. 2017. *Psych: Procedures for Personality and Psychological Research* Northwestern University, Evanston, Illinois, USA

Sánchez G., J.J. and M. M. Goodman.1992. Relationships among the mexican races of maize. *Economic Botany* 46:72-85.

SAS Institute Inc. 2002. *User's Guide of SAS (Statistical Analysis System)*. SAS Institute Inc. Cary North Carolina, USA. 550 p.

Usha R., G., V. Satyanarayana R., M. Lal A. and K. L. Narasimha R. 2017. Character association and path coefficient analysis of grain yield and yield components in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6: 4044-4050.

Varshney, R. K., D. A. Hoisington, S. N. Nayak and A. Graner. Molecular plant breeding: methodology and achievements. *In: Plant Genomics* Somers, D. J., Langridge P. and J. P. Gustaf (eds). Humana press (Ed) New York. pp: 283-304.

Venables, W. N.y B. D. Ripley. 2002 *Modern Applied Statistics with S*. Fourt Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0

Ward, J. H., Jr. 1963. "Hierarchical grouping to optimize an objective function", *Journal of the American Statistical Association* 58: 236-244.

Wellhausen, E. J., L. M. Roberts, E. Hernandez X., P. C. Mangelsdorf. 1952. Races of maize in Mexico. The Bussey Institution of Harvard University, Massachusetts, USA, 378 p.

Wen, W., J. Franco, V. H. Chávez-Tovar, J. Yan, S. Tab. 2012. Genetic characterization of a core set of a Tropical Maize race Tuxpeño for further use in Maize Improvement. PLoS ONE 7:e32626.

Widstrom, N.W, B.R. Wiseman, M.E. Snook, G.S. Nussly and B.T. Scully. 2003. Registration of the Maize Population Zapalote Chico 2451F. Crop Science 43: 444-445.

Yong, H., D. Zhang, J. Wang, M. Li, W. Liu, X. Zhang, H. Zhao, J. Weng, Z Hao, L. Bai, X. Ci, X. Li and S. Zhang. 2013. Broadening the genetic base of Chinese maize heterotic pools with exotic germplasm. Crop science 53: 1907-1916.

ANEXO

Anexo 2.1 Correlación fenotípica de los caracteres evaluados de germoplasma exótico evaluado en Valles Altos

CARÁCTER	DFM	DFF	REN	AP	AM	LHM	AHM	TH	NHAM	DT	LTE	NRP	LRC	TM	PDG	DSM	DBM	IC	LM
DFM	1.00	1.00	0.08	0.73	0.79	0.51	0.42	0.84	0.49	0.76	-0.06	0.16	-0.08	-0.03	-0.16	0.26	0.24	-0.40	0.31
DFF		1.00	0.08	0.75	0.81	0.52	0.42	0.84	0.48	0.76	-0.06	0.17	-0.07	0.01	-0.14	0.27	0.26	-0.38	0.32
REN			1.00	0.13	-0.03	0.44	0.65	0.14	-0.02	0.37	0.69	0.05	0.70	0.43	0.62	0.56	0.64	0.55	0.84
AP				1.00	0.95	0.69	0.42	0.81	0.37	0.80	0.12	0.12	0.15	0.33	0.21	0.59	0.61	-0.22	0.47
AM					1.00	0.59	0.41	0.88	0.40	0.75	-0.12	0.23	-0.10	0.18	0.02	0.47	0.46	-0.38	0.30
LHM						1.00	0.49	0.60	0.42	0.76	0.57	0.25	0.38	0.45	0.36	0.46	0.57	0.11	0.75
AHM							1.00	0.61	0.38	0.60	0.25	0.17	0.27	0.18	0.29	0.59	0.60	0.15	0.61
TH								1.00	0.67	0.85	-0.09	0.37	-0.16	0.03	-0.12	0.42	0.39	-0.40	0.40
NHAM									1.00	0.61	-0.12	0.28	-0.24	-0.14	-0.31	0.03	0.01	-0.42	0.19
DT										1.00	0.31	0.17	0.23	0.13	0.17	0.59	0.58	-0.22	0.66
LTE											1.00	-0.12	0.80	0.43	0.66	0.42	0.52	0.50	0.74
NRP												1.00	-0.49	0.01	-0.21	-0.10	-0.09	-0.20	0.13
LRC													1.00	0.55	0.73	0.50	0.61	0.60	0.68
TM														1.00	0.47	0.31	0.46	0.44	0.53
PDG															1.00	0.68	0.74	0.48	0.64
DSM																1.00	0.96	0.20	0.62
DBM																	1.00	0.40	0.71
IC																		1.00	0.31
LM																			1.00

DFM: días a floración masculina; DFF: días a floración femenina; REN: rendimiento de mazorca; AP: altura de planta; AM: altura de mazorca; LHM: longitud de hoja de mazorca; AHM: ancho de hoja de mazorca; TH: número total de hoja; NHAM: número de hojas arriba de la mazorca; DT: diámetro de tallo; LTE: longitud total de espiga; número de ramas primarias de la espiga; LRC: longitud de la rama central de la espiga; TM: total de macollos; PDG: peso de 200 granos; DSM: diámetro superior de mazorca; DBM: diámetro basal de mazorca; IC: índice de conicidad; LM: longitud de mazorca.

Anexo 2.2 Valores propios y varianza absoluta y acumulada de los componentes principales obtenidos

Componente	Valor propio	Varianza individual	Varianza total acumulada
Comp.1	2.5101168	0.4200458	0.4200458
Comp.2	1.920934	0.2459992	0.6660449
Comp.3	1.10191996	0.08094851	0.74699342
Comp.4	0.97889995	0.06388301	0.81087643
Comp.5	0.89487586	0.05338685	0.86426328
Comp.6	0.7819195	0.04075987	0.90502316
Comp.7	0.66988808	0.02991667	0.93493983
Comp.8	0.59181278	0.02334949	0.95828932

Anexo 2.3 Vectores propios para los tres componentes principales de mayor varianza explicativa para las 15 variables evaluadas.

CARACTER	COMPONENTE 1	COMPONENTE 2	COMPONENTE 3
DFM	0.144	-0.402	-0.202
REN	0.322	0.146	0.271
AP	0.239	-0.304	-0.304
LHM	0.317	-0.179	0.112
AHM	0.269	-0.149	0.169
NHAM	0	-0.396	0.148
DT	0.283	-0.334	-0.111
LTE	0.296	0.207	0
NRP	0	-0.231	0.708
LRC	0.294	0.283	-0.211
TM	0.229	0.149	0
PDG	0.28	0.252	-0.137
DSM	0.307	0	-0.267
IC	0.149	0.374	0.205
LM	0.374	0	0.158

DFM: días a floración masculina; REN: rendimiento de mazorca; AP: altura de planta; LHM: longitud de hoja de mazorca; AHM: ancho de hoja de mazorca; NHAM: número de hojas arriba de la mazorca; DT: diámetro de tallo; LTE: longitud total de espiga; NRP: número de ramas primarias de la espiga; LRC: longitud de la rama central de la espiga; TM: total de macollos; PDG: peso de 200 granos; DSM: diámetro superior de mazorca; IC: índice de conicidad; LM: longitud de mazorca.

CONCLUSIONES GENERALES

La introducción de germoplasma exótico a la región de Valles Altos, y su adaptación mediante selección masal visual, es eficiente para ampliar la variabilidad genética del maíz local de Valles Altos, porque posee una riqueza alélica amplia que puede ser utilizada en programas de mejoramiento genético para caracteres de rendimiento, precocidad, estructura morfológica y características de mazorca.

Las poblaciones exóticas después de 19 o 20 ciclos de selección masal visual, presentaron rendimiento y componentes de rendimiento adecuados para poder ser utilizados *per se* o en cruzas con materiales locales de Valles Altos.

Los materiales de origen tropical y subtropical, al ser adaptados a Valles Altos, disminuyeron su altura, tuvieron menor número de ramas primarias de espiga, y aumentaron su rendimiento. Además, las mazorcas de estos materiales y de sus cruzas adaptadas a Valles Altos mostraron mazorcas con mayor índice de conicidad que el de las poblaciones sin adaptar a Valles Altos.