



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

APTITUD COMBINATORIA Y ESTABILIDAD DE LÍNEAS DE ALTO RENDIMIENTO DERIVADAS DE MAÍZ EXÓTICO TROPICAL

FRANCISCO JAVIER PÉREZ LÓPEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2013

La presente tesis titulada: "APTITUD COMBINATORIA Y ESTABILIDAD DE LÍNEAS ALTO RENDIMIENTO DERIVADAS DE MAÍZ EXÓTICO TROPICAL", realizada por el alumno: FRANCISCO JAVIER PÉREZ LÓPEZ, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

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

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 

Dr. Ricardo Lobato Ortiz

ASESOR: 

Dr. J. Jesús García Zavala

ASESOR: 

Dr. J. Jesús López Reynoso

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2013

“Aprender sin pensar es tiempo perdido; pensar sin aprender es peligroso”.

(Confucio)

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Al Colegio de Postgraduados, PREGEP-Genética.

A los integrantes del Consejo Particular.

Al Dr. Tarcicio Cervantes Santana, Qepd.

DEDICATORIAS

A mis padres, Gregorio y Ma. de Jesús.

A mis hermanos, Alex, Magda, Adri y Eli.

A mis amigos y compañeros

y en especial a Rosario por su apoyo, cariño y comprensión.

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN GENERAL.....	viii
GENERAL ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	10
CAPÍTULO I. LÍNEAS HOMOCIGÓTICAS DE MAÍZ DE ALTO RENDIMIENTO COMO PROGENITORES DE HÍBRIDOS DE CRUZA SIMPLE.....	14
1.1 Resumen.....	14
1.2 Summary.....	15
1.3 Introducción.....	15
1.4 Materiales y métodos.....	17
1.5 Resultados y discusión.....	20
1.6 Conclusiones.....	28
1.7 Literatura citada.....	28
CAPÍTULO II. ESTABILIDAD EN LÍNEAS DE MAÍZ DE ALTO RENDIMIENTO Y EN SUS CRUZAS SIMPLES.....	31
2.1 Resumen.....	31
2.2 Summary.....	32
2.3 Introducción.....	32
2.4 Materiales y métodos.....	34
2.5 Resultados y discusión.....	36
2.6 Conclusiones.....	46
2.7 Literatura citada.....	46
CONCLUSIONES GENERALES.....	49
REVISIÓN DE LITERATURA GENERAL.....	49

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.1. Genealogía de 10 líneas de maíz altamente homocigóticas de alto rendimiento.	18
Cuadro 1.2. Cuadrados medios de las fuentes de variación de cinco variables de 10 líneas de maíz en tres ambientes, resultado del análisis de varianza combinado. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.	21
Cuadro 1.3. Comportamiento promedio de 10 líneas de maíz autofecundadas con relación a cinco variables. Combinado de tres ambientes. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.	22
Cuadro 1.4. Efectos de Aptitud combinatoria general (ACG) de 10 líneas altamente homocigóticas de maíz para cinco variables en tres ambientes. Resultado del análisis combinado. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.	23
Cuadro 1.5. Aptitud combinatoria específica (ACE) de 5 cruzas con los mayores vs. menores efectos <i>sij</i> para rendimiento de mazorca por planta (RMZP); y su respectivo efecto <i>sij</i> para NMZ, PMZ, PGMZ y PDD.	25
Cuadro 1.6. Estructura genética de las cinco cruzas simples de mayor y menor rendimiento de mazorca por planta. Combinado de tres ambientes. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.	26
Cuadro 1.7. Prueba de medias para RMZP y DFF incluyendo cruzas simples e híbridos testigos.	27
Cuadro 2.1. Genotipos, genealogía y rendimiento promedio de ambientes. Montecillo, Estado de México, Primavera-Verano 2009, 2010 y 2011.	35
Cuadro 2.2. Suma de cuadrados del análisis de varianza AMMI para 10 líneas de maíz de alto potencial de rendimiento evaluadas en Montecillo, Estado de México. Primavera-verano 2009, 2010 y 2011.	37
Cuadro 2.3. Suma de cuadrados del análisis de varianza AMMI para 45 cruzas simples más un híbrido trilineal testigo evaluados en Montecillo, Estado de México. Primavera-verano 2009, 2010 y 2011.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. <i>Biplot</i> del CP1 en función del rendimiento promedio de 10 líneas de maíz evaluadas en Montecillo, Estado de México. Primavera-Verano 2009, 2010 y 2011.	38
Figura 2.2. <i>Biplot</i> AMMI para 10 líneas de maíz de alto potencial de rendimiento. Los diamantes representan a las líneas y los vectores representan a los Años.	39
Figura 2.3. <i>Biplot</i> SREG para 10 líneas de alto potencial de rendimiento. Los códigos L representan a las líneas, los vectores representan a los Años, las líneas punteadas delimitan los mega-ambientes (números romanos) y los genotipos en los vértices del polígono fueron los mejor adaptados a los mega-ambientes donde se ubican.	40
Figura 2.4. <i>Biplot</i> del CP1 en función del rendimiento de grano promedio de 45 cruzas simples de maíz más un híbrido trilineal testigo evaluados en Montecillo, Estado de México. Primavera-Verano 2009, 2010 y 2011.	42
Figura 2.5. <i>Biplot</i> AMMI para 45 cruzas simples más un híbrido trilineal testigo. Los diamantes representan a los híbridos y los vectores representan a los Años.	43
Figura 2.6. <i>Biplot</i> SREG para 45 híbridos de crusa simple más un híbrido trilineal testigo. Los códigos H representan a los híbridos, los vectores representan a los Años, las líneas punteadas delimitan los mega-ambientes (números romanos), y los genotipos en los vértices del polígono son los mejor adaptados a los mega-ambientes donde se ubican.	44

RESUMEN GENERAL

APTITUD COMBINATORIA Y ESTABILIDAD DE LÍNEAS DE ALTO RENDIMIENTO DERIVADAS DE MAÍZ EXÓTICO TROPICAL

FRANCISCO JAVIER PÉREZ LÓPEZ, M. C.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2013

Para generar híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruce simple de manera rentable, es necesario que las líneas progenitoras hembras sean de alto rendimiento y que los híbridos generados, así como sus líneas parentales muestren buena estabilidad y adaptación ante los cambios en los ambientes de producción. El objetivo de este trabajo fue estimar la aptitud combinatoria general y aptitud combinatoria específica de 10 líneas de maíz altamente homocigóticas y de alta capacidad de rendimiento, derivadas de poblaciones de maíces exóticos adaptados a condiciones de clima templado, para emplearlas como progenitoras de híbridos de cruce simple; y determinar a través de métodos multivariados (AMMI y SREG) la estabilidad y adaptación de dichas líneas y de sus híbridos obtenidos al realizar las cruces simples posibles entre ellas. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que las líneas con mayor y menor rendimiento *per se* rindieron 7.34 t ha⁻¹ y 5.45 t ha⁻¹, respectivamente. Se identificó a la Línea 3 como el mejor progenitor para híbridos de cruces simple, al presentar los efectos más altos de ACG, buen comportamiento *per se* y participar en tres de las cinco cruces simples de mayor rendimiento. Las cruces L3xL4 y L4xL5 igualaron el rendimiento de los mejores híbridos testigos y resultaron más precoces. Por otro lado, al medir la estabilidad del rendimiento de grano, tanto en líneas como en híbridos de cruce simple, a través de métodos multivariados, AMMI y SREG, fue posible identificar a los mismos genotipos como estables; sin embargo, existieron diferencias al identificar aquellos genotipos mejor adaptados a las condiciones del ambiente de prueba. Las líneas de mayor rendimiento de grano mostraron una menor interacción genotipo x ambiente (IGA), en cambio los híbridos de cruce simple más rendidores tuvieron valores más altos de IGA.

Palabras clave: *Zea mays* L., adaptación, aptitud combinatoria, alto rendimiento, estabilidad, germoplasma exótico.

GENERAL ABSTRACT
COMBINING ABILITY AND STABILITY IN HIGH YIELDING INBRED LINES
DERIVED FROM TROPICAL EXOTIC MAIZE
FRANCISCO JAVIER PÉREZ LÓPEZ, M. C.
COLEGIO DE POSTGRUADOS, 2013

To generate profitable single-cross hybrids of maize (*Zea mays* L.), it is required that female parental inbred lines have a high yield capacity and also that parental inbred lines and their possible single cross hybrids must display a good stability and adaptation to environmental changes across locations and years. The aim of this study was to estimate the general combining ability and specific combining ability of ten highly homozygous and high yielding inbred lines of maize, derived from tropical exotic maize populations adapted to temperate conditions to be used as progenitors of single cross hybrids; and to determine by multivariate methods (AMMI and SREG) the stability and adaptation of these lines and their possible hybrids of single crosses between them. According to the results, it was found that the inbred lines with higher and lower yield *per se* yielded 7.34 tons per hectare and 5.45 tons per hectare, respectively. The inbred line L3 was identified as the best parent for the single cross hybrid, because it showed the highest GCA effects, good performance *per se* and participated in three out of the five highest yielding single crosses. The single crosses L3xL4 and L4xL5 yielded as much as the best check hybrids and were earlier. Moreover, when the stability of the grain yield in both inbred lines and single cross hybrids were measured through multivariate methods, AMMI and SREG, it was possible to identify the same genotypes as stable in both methods; however, there were some differences in identifying those genotypes better adapted to the test environments. The inbred lines that had the higher grain yield showed lower genotype x environment interaction (GEI); however, highest-yielding single cross hybrids had high values for GEI.

Keys words: *Zea mays* L., adaptation, combinatory ability, high yield, stability, exotic germplasm.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz (*Zea mays* L.) es y seguirá siendo la base de la alimentación de la población mexicana; este cultivo es de gran importancia para el país en ámbitos como el cultural, económico y político. Además, por ser centro de origen, en México se concentra la mayor diversidad genética y de formas de uso que se le da a éste cereal.

En el mundo, el mejoramiento genético y la innovación tecnológica en semillas han logrado aumentar la productividad del maíz y los ingresos de los productores (Donnet *et al.*, 2012). Sin embargo, en México actualmente del total de la superficie sembrada con maíz, únicamente un 26 a 33% de ésta se siembra con materiales mejorados, y el resto se siembra con maíces criollos (Espinosa *et al.*, 2003; Luna *et al.*, 2012).

El alto costo de la semilla es una de las principales limitantes para la no adopción de materiales mejorados (híbridos de maíz) por los productores, debido entre otras cosas, a que la mayoría de los híbridos comerciales son producto de cruza dobles o trilineales, lo que incrementa el uso de recursos económicos, mano de obra y tiempo para obtener semillas mejoradas; y como consecuencia el costo de este insumo es elevado.

Una alternativa para reducir los costos de la semilla híbrida de maíz es utilizar híbridos de cruza simple, los cuales requieren únicamente un ciclo de producción. Desde 1982 se han liberado híbridos de cruza simple en México (Espinosa *et al.*, 2003); sin embargo, éstos no han podido despegar en el mercado debido a la poca capacidad productiva de las líneas progenitoras. Para obtener líneas de maíz de alto potencial de rendimiento, Márquez (1988) señala que es necesario contar con poblaciones base de tamaño grande, variables y usar sistemas de endogamia moderado. Algunos autores han indicado alternativas para incrementar el rendimiento de las líneas parentales como son: el reciclado de líneas (Hallauer *et al.*, 2010) y el uso de irradiación gama y selección a altas densidades (Cervantes *et al.*, 2001); además, la introducción de material exótico es una buena estrategia para incorporar alelos favorables a las líneas e híbridos de maíz generados en los programas de mejoramiento genético (Dudley, 1984).

El rendimiento de un híbrido de maíz de cruza simple está asociado con la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de las líneas puras que participan en la cruza (Mendes, 2003; Sprague y Tatum, 1942). Para evaluar ACG y ACE Griffing (1956) desarrolló cuatro métodos, los cuales se basan en el análisis de las cruzas dialélicas entre un grupo de líneas de interés (Mendes, 2003); lo que permite identificar las combinaciones superiores y seleccionar a los mejores progenitores (Kempthorne y Curnow, 1961). Sprague y Eberhart (1977) mencionan que los valores de ACG están asociados a efectos de aditividad, mientras que en ACE se relacionan a efectos no-aditivos.

El estudio de la estabilidad y adaptación de líneas e híbridos de maíz es fundamental dentro de los programas de mejoramiento genético. Según Preciado y Terrón (1996), otro factor que limita la producción de semilla de híbridos de cruza simple en México es la fuerte interacción de las líneas progenitoras con el ambiente. Al respecto, Rowe y Andrew (1964) mencionan que las poblaciones homogéneas de maíz (líneas puras y cruza simple) en general muestran menor estabilidad que poblaciones heterogéneas (cruzas dobles y trilineales); sin embargo, la capacidad homeostática de las líneas e híbridos de cruza simple en ocasiones supera a la de poblaciones heterogéneas (Balestre *et al.*, 2009).

Para medir la interacción genotipo x ambiente (IGA) existen métodos que se basan en los coeficientes de regresión (Finlay y Wikilson, 1963; Eberhart y Russell, 1966); sin embargo, estos modelos no proporcionan información sobre qué genotipos o ambientes causan dicha interacción. En años recientes se han desarrollado métodos multivariados para el análisis IGA, los cuales agrupan a los genotipos con respuestas similares y facilitan la interpretación; además, permiten analizar un mayor número de ambientes y genotipos al mismo tiempo (Holts, 2001).

Los modelos multivariados AMMI y SREG han sido ampliamente utilizados en análisis de estabilidad de híbridos y líneas de maíz (Fan *et al.*, 2007; Arulselvi y Selvi, 2010; Kandus *et al.*, 2010). El modelo de interacción multiplicativo y de efectos principales aditivos (AMMI) combina un análisis estándar de varianza con un análisis de componentes principales (Zobel *et al.*, 1998); mientras que el modelo de sitios de

regresión (SREG) elimina el efecto de localidad y expresa únicamente la respuesta en función del efecto de genotipos y la interacción Genotipo x Ambiente (Kandus, 2010). Ambos modelos pueden visualizarse gráficamente por medio de *biplots*; las diferencias entre uno y otro radica en que en el análisis AMMI el *biplot* únicamente muestra los efectos de la interacción G x A; en cambio, el *biplot* del modelo SREG muestra dichos efectos, pero también es posible identificar los genotipos superiores en cada ambiente (Kandus *et al.*, 2010).

En este contexto, los objetivos generales de este trabajo fueron: i) estimar la aptitud combinatoria general y aptitud combinatoria específica de 10 líneas de maíz altamente homocigóticas y de alta capacidad de rendimiento, derivadas de poblaciones de maíces exóticos adaptados a condiciones de clima templado, para emplearlas como progenitoras de híbridos de cruce simple; ii) determinar a través de métodos multivariados (AMMI y SREG) la estabilidad y adaptación de dichas líneas y de sus híbridos obtenidos al realizar las cruces simples posibles entre ellas.

Para cumplir el primer objetivo (i) se analizaron cinco caracteres cuantitativos para evaluar el comportamiento *per se* de 10 líneas de alto potencial de rendimiento; se estimó la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de las líneas mediante un diseño dialélico (método II de Griffing); se analizó la estructura genética de las cruces simples formadas con respecto al rendimiento de mazorca por planta (RMZP) y datos de floración femenina, y se compararon dichas cruces con cuatro híbridos comerciales empleados como testigos. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y se evaluaron durante tres años (2009-2011) en Montecillo, Estado de México.

La hipótesis planteada para el primer estudio fue:

- 1) Los híbridos de cruce simple formados tendrán alta capacidad de rendimiento y características similares o superiores a los híbridos comerciales de la zona.

Para el segundo objetivo (ii), con datos de los tres años de evaluación de las líneas e híbridos de cruce simple más el híbrido trilineal Promesa como testigo, se realizó un análisis de estabilidad con modelos multivariados (AMMI y SREG), por lo cual se

utilizaron datos de rendimiento de parcela expresados en toneladas por hectárea. En ambos modelos la interacción genotipo x ambiente fue visualizada por medio de *biplots*.

Las hipótesis planteadas para este estudio fueron:

- 1) Bajo el supuesto de que las líneas son altamente homocigóticas, lo que les confiere una gran uniformidad y poca variación genética dentro de las líneas, el amortiguamiento para estabilizar el rendimiento será menor, por lo que se espera que las líneas interaccionen fuertemente con el ambiente.
- 2) Las cruza simples posibles formadas entre las 10 líneas altamente homocigóticas y de alto rendimiento, serán más estables que sus progenitores y posiblemente puedan superar en rendimiento y estabilidad al híbrido trilineal testigo.

CAPITULO I. LÍNEAS HOMOCIGÓTICAS DE MAÍZ DE ALTO RENDIMIENTO COMO PROGENITORES DE HÍBRIDOS DE CRUZA SIMPLE

HIGH YIELDING INBRED LINES OF MAIZE AS PROGENITORS OF SINGLE CROSS HYBRIDS

Francisco Javier Pérez-López, Ricardo Lobato-Ortiz, José de Jesús García-Zavala, José Domingo Molina-Galán, José de Jesús López-Reynoso, Tarcicio Cervantes-Santana (†)

¹Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Tel: 01 (595) 952-0257 Fax: 01 (595) 952-0262.

² Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carr. México-Texcoco. C.P. 56230 Chapingo, Edo. de México. Tel: 01 (595) 952-1500 Ext. 6234. Fax: 01 (595) 952-1642.

*Autor para correspondencia (*rlobato@colpos.mx*)

1.1 RESUMEN

En México, la producción de semilla de maíz de híbridos de cruza simple no es rentable debido a que las líneas autofecundadas usadas en ellos como progenitor femenino son de bajo rendimiento. El objetivo de este trabajo fue evaluar la aptitud combinatoria general y específica de 10 líneas de maíz de alto rendimiento derivadas de poblaciones de maíces tropicales exóticos adaptados para emplearlas como progenitores de híbridos de cruza simple. Las 45 cruzas dialélicas entre las 10 líneas, más los progenitores (Método II de Griffing) y cuatro híbridos comerciales empleados como testigos, se evaluaron por tres años en Montecillo, Estado de México. Las líneas se derivaron de un sistema de siembra en altas densidades e irradiación gama durante ocho ciclos de selección. Las variables evaluadas fueron el rendimiento de mazorca por planta, sus componentes y los días a floración femenina. Las líneas con mayor y menor rendimiento *per se* rindieron 7.34 t ha⁻¹ y 5.45 t ha⁻¹, respectivamente. La Línea 3 presentó los efectos más altos de ACG, buen comportamiento *per se* y participó en tres

de las cinco cruza simples de mayor rendimiento. Las cruza L3xL4 y L4xL5 igualaron el rendimiento de los mejores híbridos testigos, y resultaron más precoces. Las líneas más productivas podrían representar una ventaja en la producción de semilla de híbridos de cruza simple con alto potencial productivo, pero de menor costo.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud combinatoria, cruza dialélicas, híbridos de cruza simple, germoplasma exótico.

1.2 SUMMARY

In Mexico, the production of single-cross hybrid maize seed is not profitable because the inbred lines used as female parents are low yielding. The aim of this study was to evaluate the general and specific combining ability of ten high-yielding inbred lines of maize, which were derived from tropical exotic maize populations adapted to be used as progenitors of single cross hybrids. Forty-five single crosses among the ten lines, plus the parents (Griffing method II) and four check hybrids were evaluated, for three years at Montecillo, Mexico. The inbred lines were selected under a system of high-density planting and recurrent gamma irradiation for eight cycles of selection. The evaluated traits were the ear yield per plant, yield components and days to female flowering. The inbred lines with higher and lower yield *per se* yielded 7.34 tons per hectare and 5.45 tons per hectare, respectively. The inbred line L3 had the highest GCA effects, good performance *per se* and participated in three of the five highest yielding single crosses. The single crosses L3xL4 and L4xL5 yielded as much as the best check hybrid, and these were earlier. The most productive inbred lines could represent an advantage in seed production of the single cross hybrids with high yield potential at a lower cost.

Key words: *Zea mays* L., combinatory ability, diallelic crosses, exotic germplasm, single-cross hybrid.

1.3 INTRODUCCIÓN

La producción comercial de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruza simple inició en EE.UU. en 1960 porque ya existían líneas de alto rendimiento factibles de usarse como progenitores hembra (Crow, 1998). En México todavía no existen líneas altamente productivas, por lo que se utilizan híbridos dobles o trilineales; además, el

costo elevado, para los productores, de la semilla de híbridos de cruza simple ha limitado su producción comercial. Espinosa *et al.* (2003) señalan que la producción comercial de semilla de híbridos de maíz de cruza simple es rentable cuando las líneas progenitoras hembra tienen un rendimiento mínimo de 3000 kg ha⁻¹ de semilla. Otros factores que limitan la producción de semilla de estos híbridos son: la fuerte interacción de las líneas progenitoras con el ambiente, la falta de mejoramiento en las poblaciones usadas como fuente de líneas, y el riesgo de perder el control de los progenitores (Preciado y Terrón, 1996).

Para obtener líneas de maíz con alto potencial de rendimiento, Márquez (1988) señala que es necesario disponer de poblaciones base de tamaño grande, variables, y de alto rendimiento, y usar sistemas de endogamia moderado y, según Hallauer *et al.* (2010), se puede incrementar su rendimiento al seleccionar y mejorar las líneas existentes. Cervantes *et al.* (2001), mediante irradiación gama y selección en altas densidades, obtuvieron líneas con baja endogamia y alto rendimiento. Las líneas con bajos niveles de endogamia son vigorosas (Astete y Branco, 2002), por lo cual son más rendidoras, y al usarlas como progenitores de híbridos de cruza simple aumentaría la producción de semilla del progenitor hembra.

La introducción de material exótico de maíz a los programas de mejoramiento permite aumentar la diversidad genética con alelos favorables carentes en las poblaciones locales, por lo que es posible transferir y aprovechar estos nuevos alelos en líneas de maíz y en los híbridos generados (Dudley, 1984).

Las cruzas dialélicas permiten estimar los componentes de la variación genética, identificar las combinaciones superiores y seleccionar los mejores progenitores para el diseño de métodos de mejoramiento eficientes (Kempthorne y Curnow, 1961; Gutiérrez *et al.*, 2002). Al respecto, Sprague y Tatum (1942) definieron la aptitud combinatoria general (ACG) como el comportamiento promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, y la aptitud combinatoria específica (ACE) como los casos en los que ciertas combinaciones híbridas específicas se expresan de forma favorable o no con respecto al comportamiento promedio de sus progenitores. Griffing (1956) desarrolló cuatro métodos para evaluar ACG y ACE: el primero considera a los progenitores y sus cruzas

F₁ directas y recíprocas; el segundo incluye a los progenitores y sus cruzas directas F₁; el tercero considera las cruzas F₁ directas y recíprocas; y el cuarto considera la evaluación de las cruzas F₁ directas únicamente.

Mendes *et al.* (2003), Reyes *et al.* (2004), y Escorcía *et al.* (2010) señalan que una craza simple es de alto rendimiento cuando las dos líneas progenitoras son de alta ACG, o bien, al menos una línea es de alta ACG, pero presenta efectos positivos altos de ACE. Las líneas con efectos altos de ACG pueden emplearse para desarrollar variedades sintéticas, mientras que combinaciones específicas de alto rendimiento pueden explotarse en la hibridación (Sprague y Eberhart, 1977). Los efectos de ACG se relacionan con efectos de aditividad y son explotados por selección y luego por hibridación, mientras que los efectos de ACE se deben a efectos de dominancia y epistáticos (Inram *et al.*, 2004) y son explotados por la hibridación.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la aptitud combinatoria general y aptitud combinatoria específica de 10 líneas altamente homocigóticas y de alta capacidad de rendimiento, derivadas de poblaciones de maíces tropicales exóticos adaptados a condiciones de clima templado, para emplearlas como progenitoras de híbridos de craza simple.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron las 45 cruzas posibles entre 10 líneas de maíz altamente homocigóticas de alto potencial de rendimiento, derivadas de germoplasma exótico, más 10 líneas progenitoras y cuatro híbridos comerciales como testigos; es decir, se evaluaron 59 genotipos. Las líneas fueron generadas por el Dr. T. Cervantes S. del Colegio de Postgraduados, quien aplicó una metodología que consistió en sembrar las poblaciones en altas densidades (200,000 plantas ha⁻¹), en las cuales, antes de la floración, se seleccionaron y autofecundaron las plantas más vigorosas y precoces, bajo el supuesto de que éstas tenían una alta frecuencia de alelos favorables dominantes, hasta terminar el ciclo de cultivo con densidades de 80,000 plantas ha⁻¹. A la cosecha se formaba un compuesto balanceado con igual número de semillas por mazorca de las plantas seleccionadas. Esta metodología se repitió por ocho ciclos; además se aplicó irradiación gama de Cobalto 60 entre cada ciclo de selección (Cruz *et al.*, 2010). La

genealogía de las líneas se encuentra en el Cuadro 1.1. Los híbridos comerciales testigo fueron: HS-2, AMCCG01, AMCCG02 y PROMESA.

Cuadro 1.1. Genealogía de 10 líneas de maíz altamente homocigóticas de alto rendimiento.

Línea	Genealogía
1	[†] R.T.M.-53-3-4-4-1-3-14#
2	[[Chapalote (Sin.2) x Tuxpeño (Oax. 9)]]F25
3	R.T.M. – Comp. 1B(0.5-1.0)-5-2-3-16#
4	^{††} C.R.T 15R1M1-20R4M1-15R1M1-11R1M1 14R1M2-18R1M1-25R1M1-2744-61-24#
5	R.T.M.-47-3-1-2-3-2-17#
6	R.T.M. – Comp. 1B (0.5-1.0)-1-1-3-17#
7	[[Tuxpeño (Oax. 9) x Olotillo (Chis. 81)]]F25
8	[[Blandito (Sin. 61) x Pepitilla (Mor. 102)]]F25
9	R.T.M. – Comp. 1B (0.5-1.0)-5-3-3-24#
10	C.R.T. – Comp. 1a (0.5-1.0)-5-1-3-19#

[†]RTM: razas tropicales de maíz; ^{††}CRT: compuesto de razas tropicales.

Los 59 genotipos se sembraron en los ciclos P-V 2009, 2010, y 2011 en Montecillo, Estado de México, donde prevalecen condiciones de clima tipo Cw (i) B/2 (a´) templado con lluvias en verano; precipitación media anual de 655.6 mm; temperatura media anual de 16.3°C. Cada ciclo de cultivo se sembró en el mes de mayo y se aplicaron riegos de auxilio suficientes hasta el establecimiento de las lluvias. Se fertilizó con 120 kg N y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹; todo el P₂O₅ y la mitad del N se aplicó a la siembra y el resto en la escarda (30 días después de la siembra, dds). La maleza se controló con el herbicida Gesaprim Calibre 90 GDA®, aplicado 15 dds en una dosis de 3 L ha⁻¹.

Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en cada año de evaluación. La parcela experimental consistió en dos surcos de 6 m de largo, con 40 cm entre plantas y dos plantas por mata (62 500 plantas ha⁻¹).

Se midieron 14 caracteres cuantitativos, y con los datos de los tres años de evaluación se aplicó un análisis de correlación para identificar las cinco variables que presentaron mayor correlación positiva con el rendimiento de mazorca por planta. Estas variables fueron: número de mazorcas por planta (NMZ, número total de mazorcas por parcela experimental entre número de plantas); peso de mazorca (PMZ, g, peso seco por mazorca, promedio de cinco mazorcas seleccionadas al azar por parcela); peso seco de grano por mazorca (PGMZ, g, peso promedio de las cinco mazorcas); porcentaje de desgrane [(PDD = (PMZ/PGMZ x 100)]; y rendimiento de mazorca por planta (RMZP, g, peso de las mazorcas secas por parcela entre el número de plantas por parcela).

Se realizó un análisis de varianza combinado para los tres años de evaluación para cada variable. La suma de cuadrados de cruza se dividió en suma de cuadrados de ACG y suma de cuadrados de ACE. Se estimaron los efectos de ACG (\hat{g}_i) de las 10 líneas y los efectos de ACE (\hat{s}_{ij}) de las 45 cruza posibles.

En el análisis genético se usó el método II del modelo del diseño dialélico de Griffing (1956):

$$Y_{ijklm} = \mu + \alpha_l + b_{kl} + v_{ij} + (av)_{ijl} + e_{ijkl},$$

Se consideró que: $v_{ij} = g_i + g_j + s_{ij}$, y $(av)_{ijl} = (ag)_{il} + (ag)_{jl} + (as)_{ijl}$.

Donde: Y_{ijk} = valor observado; μ = media general; b_{kl} = efecto de bloque o repeticiones dentro de ambientes; α_l = efecto ambiental; v_{ij} = efecto de cruce; av = interacción entre ambientes y cruza; e_{ijkl} = efecto residual o error; g_i = efecto de ACG para cada progenitor i ; g_j = efecto de ACG para cada progenitor j ; s_{ij} = efecto de ACE de la cruce ij ; $(ag)_{il}$ = efecto de interacción entre el efecto g_i y el ambiente l ; $(ag)_{jl}$ = efecto de interacción entre el efecto g_j y el ambiente l ; $(as)_{ijl}$ = efecto de la interacción entre el efecto s_{ij} y el ambiente l .

La estructura genética para el rendimiento (RMZP) de las 45 cruza se construyó mediante el modelo del diseño dialélico de Griffing (1956) como sigue:

$$Y_{ij} = \hat{\mu} + \hat{g}_i + \hat{g}_j + \hat{s}_{ij}$$

Donde: Y_{ij} = rendimiento observado de la cruz ij en promedio de repeticiones y ambientes; \hat{u} = media general estimada; \hat{g}_i , \hat{g}_j , \hat{s}_{ij} , estimadores de los efectos g_i , g_j , s_{ij} , respectivamente.

La comparación de medias en cada carácter se hizo mediante la prueba de medias Tukey ($\alpha= 0.05$). En este caso, se hizo una comparación especial del RMZP de los 10 mejores genotipos incluyendo los híbridos comerciales, en los que se agregó la variable días a floración femenina (DFF), en promedio de los tres ambientes.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza general

Los cuadrados medios del análisis de varianza combinado presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre ambientes para todos los caracteres (Cuadro 1.2), lo que indica que las condiciones y efectos ambientales fueron diferentes en los tres años de evaluación. Los efectos de ACG y ACE fueron significativos ($P \leq 0.01$) para todas las variables. En la suma de cuadrados (datos no presentados) de las cruzas, la variación correspondiente a efectos de ACG para las cinco variables fue: 24% (RMZP), 30% (NMZ), 31% (PMZ), 31% (PGMZ), y 15% (PDD); en cambio, en los efectos de ACE los resultados fueron: 76% (REN), 70% (NMZ), 69% (PMZ), 69% (PIG) y 85% (PDD). Esto indica que los efectos no-aditivos tuvieron mayor importancia en la expresión de la variación genética de esas variables que los efectos aditivos. González *et al.* (1997) y de la Rosa *et al.* (2006) también encontraron mayor contribución de los efectos no-aditivos en rendimiento y sus componentes al evaluar cruzas dialélicas de maíz. Por su parte Vasal *et al.* (1992) señalan que los efectos de ACE son mayores en cruzas de maíz cuyas líneas progenitoras son derivadas de distintas poblaciones y razas.

Cuadro 1.2. Cuadrados medios de las fuentes de variación de cinco variables de 10 líneas de maíz en tres ambientes, resultado del análisis de varianza combinado. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.

F.V.	GL	RMZP (g pl)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
Amb	3	57596.59 ^{††}	964.04 ^{††}	46483.49 ^{††}	51115.86 ^{††}	705.94 ^{††}
Rep (Amb)	9	222.00	45.13 [†]	143.93	112.15	3.18
Cruzas	54	1617.85 ^{††}	173.30 ^{††}	676.47 ^{††}	598.40 ^{††}	20.58 ^{††}
ACG	9	2371.00 ^{††}	308.16 ^{††}	1247.48 ^{††}	1106.55 ^{††}	17.93 ^{††}
ACE	45	1467.22 ^{††}	146.33 ^{††}	562.28 ^{††}	496.78 ^{††}	21.11 ^{††}
Cruzas*Amb	108	642.29 ^{††}	76.61 ^{††}	314.63 ^{††}	252.32 ^{††}	9.48 ^{††}
ACG*Amb	18	708.65 [†]	96.76 ^{††}	250.78 ^{††}	184.27 [†]	12.23 [†]
ACE*Amb	90	629.03 ^{††}	72.59 ^{††}	327.41 ^{††}	265.94 ^{††}	8.92 ^{††}
Error	486	310.83	21.75	85.81	78.83	4.61
C.V. (%)		15	8	6	7	2

[†]p ≤ 0.05 y ^{††}p ≤ 0.01; ACG y ACE= aptitud combinatoria general y específica, respectivamente; GL= grados de libertad; RMZP= rendimiento de mazorca por planta; NMZ= número de mazorcas por parcela; PMZ= peso de mazorca; PGMZ= peso seco de grano por mazorca; PDD= porcentaje de desgrane; CV= coeficiente de variación.

La interacción cruzas por ambiente resultó altamente significativa para todas las variables (Cuadro 1.2), lo que indica que el comportamiento de las cruzas varió en los ambientes de evaluación, infiriéndose falta de estabilidad. La suma de cuadrados de la interacción cruzas por ambiente se dividió en ACG y ACE por ambientes, donde todas las variables mostraron alta significancia (p ≤ 0.01), excepto PGMZ y PDD que presentaron significancia (p ≤ 0.05) en la interacción ACG por ambientes. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 2 y 15 %.

Comportamiento *per se* de las líneas

De acuerdo con el comportamiento promedio las líneas en los tres años de evaluación (Cuadro 1.3), se identificaron al menos dos grandes grupos que contrastaron en rendimiento de mazorca por planta. El grupo superior incluyó a las líneas 1, 2 y 3, y el

grupo inferior a las líneas 7, 10 y 4. Las diferencias entre el promedio de las tres primeras líneas (117 g) con respecto a las tres últimas (95 g) equivale a 19 %. Destaca que las tres primeras líneas también se ubicaron en el grupo superior para las cuatro variables de interés: NMZ, PMZ, PIG y PDD.

Cuadro 1.3. Comportamiento promedio de 10 líneas de maíz autofecundadas con relación a cinco variables. Combinado de tres ambientes. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Línea	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
2	117.6a	51bcd	153.2ab	133.1ab	86a
1	116.9a	58a	145.8abcd	127.7abcd	87a
3	116.7a	56ab	149.9abc	131.5abc	87a
6	110.8ab	50bcd	154.5a	135.4a	87a
9	110.3ab	54abc	139.3dc	118.8dc	85a
8	102.6abc	48cd	144.3abcd	124.8abcd	86a
5	101.8abc	52abcd	139.2dc	122.0bcd	87a
4	99.5abc	57a	134.3d	116.6d	86a
10	97.8bc	53abc	140.7bcd	120.5bcd	85a
7	87.2c	46d	144.3abcd	123.5abcd	85a

Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$); RMZP= rendimiento de mazorca por planta; NMZ= número de mazorcas por parcela; PMZ= peso de mazorca; PGMZ= de grano por mazorca; PDD= porcentaje de desgrane.

El rendimiento potencial de las líneas, con base en una densidad de siembra de 62,500 plantas por hectárea, indicó que las 10 líneas son altamente productivas, con 7.34 t ha^{-1} y 5.45 t ha^{-1} para la línea con mayor y menor rendimiento, respectivamente. Los rendimientos estimados son superiores a 3000 kg ha^{-1} , que es el mínimo considerado que una línea de maíz debe producir para ser utilizable como progenitor femenino en híbridos de cruza simple (Espinosa *et al.*, 2003).

Aptitud combinatoria general

Los mayores efectos positivos de ACG para rendimiento de mazorca por planta correspondieron a las líneas 3 y 2, mientras que las líneas 7 y 5 presentaron los efectos negativos más bajos (Cuadro 1.4). Los efectos de aptitud combinatoria general para NMZ, PMZ y PGMZ fueron positivos para las líneas 3 y 2; en cambio, en todos los caracteres fueron negativos para las líneas 7 y 5.

Cuadro 1.4. Efectos de Aptitud combinatoria general (ACG) de 10 líneas altamente homocigóticas de maíz para cinco variables en tres ambientes. Resultado del análisis combinado. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Línea	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
1	0.6	1.3 ^{††}	-0.7	-0.7	-0.1
2	2.4	0.5	1.5	0.7	-0.4
3	5.5 ^{††}	2.2 ^{††}	2.4	2.2	0.1
4	1.8	1.5 ^{††}	-5.0 ^{††}	-3.8 ^{††}	0.3
5	-3.9 [†]	-0.4	-2.4	-2.4	-0.1
6	1.1	-1.3 ^{††}	4.0 ^{††}	4.4 ^{††}	0.6 ^{††}
7	-8.0 ^{††}	-2.6 ^{††}	-0.6	-0.9 [†]	-0.2
8	-0.9	-0.9	3.9 ^{††}	3.9 ^{††}	0.4
9	1.0	0.3	-2.5	-2.4	-0.2
10	0.006	-0.6	-0.5 ^{††}	-1.0	-0.4 [†]

[†]p ≤ 0.05 y ^{††}p ≤ 0.01; RMZP= rendimiento de mazorca por planta; NMZ= número de mazorcas por parcela; PMZ= peso de mazorca; PGMZ= peso seco de grano por mazorca; PDD= porcentaje de desgrane.

En general las líneas mostraron efectos bajos y algunos negativos de ACG, lo cual podría deberse a que las líneas fueron seleccionadas por su comportamiento *per se* en campo y no con base en una prueba temprana de ACG, lo que podría suponer que algunas de ellas todavía son portadoras de alelos recesivos no favorables en muchos de sus *loci*, dando como resultado valores aditivos bajos en promedio de todos los individuos cuando tales alelos se ponen en condición homocigótica.

De acuerdo con los resultados, las líneas 3 y 2 podrían ser buenos progenitores para híbridos de cruce simple, debido a que presentaron efectos positivos para ACG y además mostraron buen comportamiento *per se* para rendimiento y sus componentes.

Aptitud combinatoria específica

De las 45 cruzas simples posibles sólo se muestran dos grupos de 10 cruzas (Cuadro 1.5); las cinco con los mayores y las cinco con los menores efectos de ACE para rendimiento de mazorca por planta. Para el primer grupo se observa que cuando interaccionaron líneas de baja ACG con líneas de alta ACG, los valores de ACE para los caracteres NMZ, PMZ y PGMZ fueron negativos (L3xL4); mientras que en las cruzas donde ambas líneas fueron de baja ACG, los valores de ACE para todos los caracteres fueron positivos (L8xL9). En el segundo grupo de cruzas con efectos de ACE negativos, se observaron interacciones entre líneas de alta y baja ACE (L2xL6 y L3xL8), y también en las cruzas donde ambas líneas fueron de baja ACE (L7xL10, L5xL9, y L1xL5). Al respecto, De la Cruz *et al.* (2005) indican que en cruzas con altos y bajos efectos de ACE participan líneas con baja y alta ACG.

Cuadro 1.5. Aptitud combinatoria específica (ACE) de 5 cruzas con los mayores vs. menores efectos s_{ij} para rendimiento de mazorca por planta (RMZP); y su respectivo efecto s_{ij} para NMZ, PMZ, PGMZ y PDD.

Cruza	RMZP (g)	NMZ	PMZ (g)	PGMZ (g)	PDD (%)
Cruzas simples con los mayores efectos ACE					
L4xL5	18.06 ^{††}	-3.19 [†]	9.14 [†]	6.43	-0.80
L8xL10	15.40 ^{††}	3.67 [†]	7.20	5.85	-0.15
L3xL4	15.06 ^{††}	-2.9	-5.03	-4.42	0.05
L8xL9	12.66 [†]	1.66	12.88 ^{††}	11.73 ^{††}	0.22
L1xL7	12.35 [†]	2.16	-1.83	-0.28	0.90
Cruzas simples con los menores efectos de ACE					
L3xL8	-12.6 [†]	0.75	-0.17	-1.14	-0.68
L7xL10	-9.94	-2.20	-2.83	-3.79	-0.78
L2xL6	-8.5	-0.33	-2.41	-1.67	0.32
L5xL9	-6.7	1.50	-1.37	-1.81	-0.30
L1xL5	-6.7	-3.26 [†]	1.57	4.26	1.85 [†]

[†]p ≤ 0.05 y ^{††}p ≤ 0.01; RMZP= rendimiento de mazorca por planta; NMZ= número de mazorcas por parcela; PMZ= peso de mazorca; PGMZ= peso seco de grano por mazorca; PDD= porcentaje de desgrane.

Estructura genética de las cruzas

En relación con la estructura genética de las cinco cruzas simples con mayor y menor rendimiento de mazorca por planta, se observa en el Cuadro 1.6 que en las cruzas de mayor rendimiento, participó al menos una línea con efectos positivos de alta ACG, además de que los efectos de ACE fueron positivos y altos; en cambio, en las cruzas de menor rendimiento el efecto de ACG fue negativo en al menos una línea, y el efecto de ACE fue negativo en todos los casos: esto coincide con los resultados obtenidos por Mendes *et al.* (2003), Reyes *et al.* (2004), y Escorcía *et al.* (2010).

Cuadro 1.6. Estructura genética de las cinco cruzas simple de mayor y menor rendimiento de mazorca por planta. Combinado de tres ambientes. Montecillo Edo. México. P-V 2009, 2010 y 2011.

Cruza	X_{ij}	μ	g_i	g_j	s_{ij}
Cruzas simples de mayor rendimiento					
L3xL4	141.96	119.59	5.49 ^{††}	1.77	15.06 ^{††}
L4xL5	135.58	119.59	1.77	-3.88 ^{††}	18.06 ^{††}
L3xL10	135.36	119.59	5.49 ^{††}	0.006	10.28
L2xL3	134.37	119.59	2.39	5.49 ^{††}	6.49
L8xL10	134.15	119.59	-0.88	0.006	15.40 ^{††}
Cruzas simples de menor rendimiento					
L3xL8	111.63	119.59	5.49 ^{††}	-0.88	-12.60
L5XL9	110.12	119.59	-3.88 ^{††}	1.00	-6.70
L1XL5	109.57	119.59	0.60	-3.88 ^{††}	-6.70
L5XL7	105.34	119.59	-3.88 ^{††}	-8.00 ^{††}	-2.40
L7XL10	101.70	119.59	-8.00 ^{††}	-0.88	-9.94

[†] $p \leq 0.05$ y ^{††} $p \leq 0.01$.

En las cinco cruzas simples de mayor rendimiento, los efectos de ACE fueron mayores a la suma de los efectos de ACG de sus progenitores, lo que indica que los efectos no-aditivos fueron más importantes que los aditivos. Las cruzas simples de alto rendimiento se pueden manejar como híbridos potenciales cuando los efectos no-aditivos son mayores, como lo señala Reyes (2004), pero se buscará que ambos efectos, aditivos y no aditivos, sean altos. La Línea 3 estuvo presente en tres de las cinco cruzas simples con mayor rendimiento. Esta línea presentó alto rendimiento *per se*, alta ACG y alta ACE en combinaciones específicas. En cambio, la Línea 5 que estuvo presente en tres de las cinco cruzas de menor rendimiento, presentó menor rendimiento *per se*, baja ACG y baja ACE en combinaciones específicas.

Comparación de las cruzas simples con respecto a los testigos

En el Cuadro 1.7 se muestran los diez genotipos que tuvieron el mayor rendimiento de mazorca por planta, donde destacaron 2 testigos y 8 cruzas simples. Los híbridos comerciales HS-2 y AMCCG-01 tuvieron los promedios más altos, pero dos cruzas simples (L3xL4 y L4xL5) fueron estadísticamente iguales a tales híbridos testigos. Los días a floración femenina tuvieron un valor promedio de 74 días para las ocho cruzas simples de mayor RMZP, resultando más precoces, pues los híbridos comerciales de mayor rendimiento presentaron valores para DFF que oscilaron entre los 79 y 81 días.

Cuadro 1.7. Prueba de medias para RMZP y DFF incluyendo cruzas simples e híbridos testigos.

Genotipo	RMZP	DFF
HS-2	164.0a	83a
AMCCG-01	144.2ab	79b
L3xL4	141.9abc	76cdefg
L4xL5	135.5abcd	74ijklmnopq
L3xL10	135.3bcd	74hijkl
L2xL3	134.3bcde	75cdefgh
L8xL10	134.1bcdef	73mnopqr
L8xL9	132.4bcdefg	73pqrs
L2xL9	131.8bcdefg	73opqrs
L6xL10	130.2bcdefg	74ijklmnopq

Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$).

En el presente estudio se logró identificar dos cruzas simples que igualaron estadísticamente a los híbridos comerciales de mayor rendimiento, y por lo menos ocho cruzas simples que superaron a los híbridos testigos PROMESA y AMCCG-02. En relación con el número de días a floración femenina, las cruzas simples de mayor rendimiento en general resultaron más precoces que los cuatro híbridos comerciales (Cuadro 7). Es de notarse que la precocidad de las cruzas simples puede deberse a que en la metodología de obtención de las líneas se eliminaron las plantas más tardías y menos altas, las cuales no soportaron la competencia de las plantas precoces que crecieron más rápido y las sombrearon. Esto permitió que las plantas seleccionadas

resultaran cuando menos de igual precocidad y altura que la variedad original, pero con mayor capacidad de rendimiento.

Las cruzas simples L3xL4 y L4xL5 podrían usarse potencialmente como híbridos comerciales de cruce simple, debido a que las líneas progenitoras en ambas mostraron buen rendimiento de semilla, y las cruzas simples mostraron rendimientos similares a los mejores híbridos testigos. Por otro lado, los híbridos HS-2 y AMCCG-01 se originan de cruzas trilineales, por lo que requieren de más de un ciclo agrícola y más trabajo para obtener y mantener su semilla; de aquí la ventaja de las cruzas simples de alto rendimiento identificadas en este estudio, ya que podrían reducir el costo de la semilla para el productor. Además estos dos híbridos fueron los más tardíos.

1.6 CONCLUSIONES

El rendimiento estimado de semilla de las 10 líneas en estudio fue superior a 3000 kg ha¹, lo que las hace económicamente rentables para utilizarlas como progenitoras hembra en híbridos de cruce simple. En las cinco cruzas simples de mayor rendimiento, al menos una línea progenitora mostró efectos positivos de ACG y efectos de ACE positivos y altos. Se identificó a la Línea 3 como un progenitor potencial para híbridos de cruza simple, ya que presentó efectos positivos de ACG, altos efectos de ACE en combinaciones específicas y buen rendimiento *per se*. Además, participó en tres de las cinco cruzas simples con mayores rendimientos. Se identificaron dos híbridos de cruce simple con rendimientos similares a los mejores híbridos testigo, pero más precoces. Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis planteada para las variables RMZP y DFF. Las líneas más productivas podrían representar una ventaja en la producción de semilla al generar híbridos de cruce simple a menor costo.

1.7 LITERATURA CITADA

- Astete M., F., and J. Branco de M. 2002.** Inbreeding depression in maize populations of reduced size. *Sci. Agric.* 59:335-340.
- Cervantes S., T., M. Oropeza R., y D. Reyes L. 2001.** Selección para rendimiento y heterosis de líneas endogámicas de maíz irradiado. *Agrociencia* 34:421-431.
- Crow J., F. 1998.** 90 years ago: the beginning of hybrid maize. *Genetics* 148:923-928.

- Cruz I., S., A. Muratalla L., and A.T. Kato Y. 2010 (Comp.).** Cruzas Dialélicas de Líneas de Maíz Exóticas Adaptadas de Alto Rendimiento. La Investigación al Servicio del Campo Mexicano. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. pp. 10-12
- De la Cruz-Lázaro., E., S Rodríguez-Herrera., M. Estrada-Botello., J. Mendoza-Palacio., y N. Brito-Manzano. 2005.** Análisis dialélico de líneas de maíz QPM para características forrajeras. U.yC. 21:19-26.
- De la Rosa L., A., H. De León C., F. Rincón S., y G. Martínez Z. 2006.** Efectos genéticos, heterosis y diversidad genética entre híbridos comerciales de maíz adaptados al el Bajío Mexicano. Rev. Fitotec. Mex. 29:247-254.
- Dudley J., W. 1984.** A method for identifying populations containing favorable alleles not present in elite germplasm. Crop Sci. 24: 1053-1054.
- Escorcía G., N., J. Molina G., F. Castillo G., y J. Mejía C. 2010.** Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruas simples de maíz. Rev. Fitotec. Mex. 33:271-279.
- Espinosa C., A., M. Sierra M., y N. Gómez M. 2003.** Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. Agron. Mesoam. 14:117-121.
- González S., H. Córdova., S. Rodríguez., H. De León., y V. Serrato. 1997.** Determinación de un patrón heterótico a partir de la evaluación de un dialélico de diez líneas de maíz Subtropical. Agron. Mesoam. 8:01-07.
- Griffing B. 1956.** Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Aust. J. Biol. Sci. 9:463-493.
- Gutiérrez D., E., A. Palomo G., A. Espinoza B., y E. De la cruz L. 2002.** Aptitud combinatoria y heterosis para rendimiento de líneas de maíz en la Comarca Lagunera, México. Rev. Fitotec. Mex. 25:271-277.
- Hallauer A., R., M. Carena and J.B. Miranda F. 2010.** Quantitative Genetics in Maize Breeding. Springer-Verlag New York Inc. pp. 322-332.
- Inram M., S., H. Nawaz M., H. Mahmood M., y M. Munir. 2004.** General and specific combining ability studies in maize diallel crosses. Int. J. Agric. Biol. 6:856-859.

- Kempthorne O., and R. Curnow N. 1961.** The partial diallel cross. *Biometrics* 17:229-250.
- Márquez S., F. 1988.** Genotécnia Vegetal. Tomo II (métodos, teoría y resultados). AGT EDITOR, S.A. México. pp. 472-473.
- Mendes A., A., L. Carlini-Garcia., A. Resende S., M. Figueireido S., A. Franco G., and C. Lopes S. 2003.** Combining ability of inbred lines of maize and stability of their respective single-crosses. *Sci. Agric.* 60: 83-89.
- Preciado O., R., y A. Terrón I. 1996.** Efectos heteróticos entre y dentro de fuentes de germoplasma de maíz a través de cruza simples emparentadas. *Agric. Tec. Mex.* 22:219-230.
- Reyes L., D., J. Molina G., M. Oropeza R., y E. Moreno P. 2004.** Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza Tuxpeño. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:49-56.
- Sprague G., F., and S. Eberhart A. 1977.** Corn and Corn Improvement. American Society of Agronomy. Madison , W. pp: 305-363
- Sprague G., F., and A. Tatum L. 1942.** General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34:923-32.
- Vasal S., R., G. Sirinivasan, and C. Han G. 1992.** Heterotic patterns of eighty-eight white subtropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 37:319-327.

CAPÍTULO II. ESTABILIDAD EN LÍNEAS DE MAÍZ DE ALTO RENDIMIENTO Y EN SUS CRUZAS SIMPLES

STABILITY IN HIGH YIELDING MAIZE LINES AND IN ITS SINGLE CROSSES

Francisco Javier Pérez-López, Ricardo Lobato-Ortiz, José de Jesús García-Zavala, José Domingo Molina-Galán, José de Jesús López-Reynoso, Tarcicio Cervantes-Santana (†)

¹Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Tel: 01 (595) 952-0257 Fax: 01 (595) 952-0262.

²Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carr. México-Texcoco. C.P. 56230 Chapingo, Edo. de México. Tel: 01 (595) 952-1500 Ext. 6234. Fax: 01 (595) 952-1642.

*Autor para correspondencia (*rlobato@colpos.mx*)

2.1 RESUMEN

Conocer la estabilidad y adaptación de los materiales mejorados es fundamental para los fitomejoradores. Por ello, el objetivo de este trabajo fue determinar a través de métodos multivariados (AMMI y SREG) la estabilidad y adaptación de 10 líneas de maíz (*Zea mays* L.) de alto potencial de rendimiento de grano y de sus híbridos de cruce simple posibles. Se evaluaron las 45 cruzas simples entre las 10 líneas, más los progenitores y un híbrido trilineal empleado como testigo, por tres años en Montecillo, Estado de México. Las líneas se derivaron de material exótico tropical y fueron seleccionadas bajo un sistema de siembra en altas densidades e irradiación gama recurrente durante ocho ciclos de selección. Se midió el rendimiento de grano expresado en toneladas por hectárea. Ambos modelos, AMMI y SREG, identificaron a los mismos genotipos como estables, pero mostraron diferencias en la identificación de los mejor adaptados a las condiciones ambientales del ambiente de prueba. Sin embargo, el modelo SREG agrupó de mejor forma los años evaluados y pudo identificar plenamente aquellas líneas y cruzas simples que se adaptaron mejor tanto a condiciones óptimas como adversas en una misma localidad.

PALABRAS CLAVE: *Zea mays* L., adaptación, estabilidad, germoplasma exótico, métodos multivariados, rendimiento de grano.

2.2 SUMMARY

Knowing the stability and adaptation of improved materials is essential for plant breeders. The aim of this work was to determine by multivariate methods (AMMI and SREG) the stability and adaptation of ten high yielding maize (*Zea mays* L.) inbred lines and their possible single cross hybrids. Forty-five single crosses among the 10 lines, plus the parents and a trilinear hybrid were evaluated, for three years at Montecillo, Mexico. The inbred lines were derived from tropical exotic materials and selected under a system of high-density planting and recurrent gamma irradiation for eight cycles of selection. Grain yield in tons per hectare was measured. Both AMMI and SREG models identified the same genotypes as stable ones, but they showed differences in identifying the better one adapted to the environmental conditions. However, the SREG model grouped in a better way the evaluated years and could identify those lines and single crosses that were better adapted to both optimal and adverse conditions in the same locality.

Key Words: *Zea mays* L., adaptation, exotic germplasm, stability, multivariate methods, yield.

2.3 INTRODUCCIÓN

Los caracteres cuantitativos de importancia económica como el rendimiento de grano son altamente influenciados por el ambiente, es por ello que en los programas de mejoramiento genético siempre se busca obtener genotipos de alto rendimiento pero estables al mismo tiempo.

Las poblaciones homogéneas de maíz (*Zea mays* L.), líneas puras y cruza simples, en general muestran menor estabilidad que poblaciones de grupos segregantes (Rowe y Andrew, 1964; Hallauer *et al.*, 2010); esto se debe a que ellas dependen del amortiguamiento individual para estabilizar el rendimiento (Allard y Bradshaw, 1964). Por otro lado, las cruza dobles y trilineales son poblaciones de condición heterogénea; esto les confiere una menor interacción ambiental en comparación con

las cruzas simples; aunque es posible que ciertas cruzas simples presenten igual o mayor estabilidad que las cruzas dobles o trilineales más estables, ya que esta característica está controlada genéticamente (Scott, 1967).

El estudio de la interacción genotipo por ambiente (IGA) permite clasificar a los genotipos en estables o adaptados de acuerdo con el comportamiento de sus caracteres agronómicos en un determinado ambiente (Kandus *et al.*, 2010). De acuerdo con Becker y León (1988), un genotipo es estable cuando sus características no cambian a pesar de ocurrir variaciones en las condiciones ambientales; mientras que el término adaptación se refiere al hecho de que una población, organismo o genotipo sobreviva y se reproduzca en un conjunto de ambientes (Allard y Hansche, 1964).

Para el análisis IGA se utilizan métodos basados en regresiones lineales (Finlay y Wikilson, 1963; Eberhart y Russell, 1966) que analizan la estabilidad a través de la respuesta lineal de los genotipos ante los cambios en el ambiente, pero no proporcionan información sobre qué genotipos o ambientes causan la interacción; en cambio, los métodos multivariados agrupan genotipos con respuestas similares, con lo que se facilita la interpretación y el utilizar un mayor número de ambientes y genotipos en el análisis (Hohls, 2001).

Los análisis AMMI y SREG son métodos multivariados ampliamente difundidos y con gran aceptación para realizar estudios de estabilidad. El modelo de interacción multiplicativo y de efectos principales aditivos (AMMI) combina un análisis estándar de varianza con un análisis de componentes principales (Zobel *et al.*, 1998); mientras que el modelo de sitios de regresión (SREG) elimina el efecto de localidad y expresa únicamente la respuesta en función del efecto de genotipos y la interacción Genotipo x Ambiente (Kandus, 2010). La visualización gráfica en el análisis AMMI se obtiene por medio de *biplots* (Gabriel, 1971), mientras que en el análisis SREG se utiliza un gráfico llamado *biplot* GGE, descrito por Yan *et al.* (2000).

El objetivo de este estudio fue determinar a través de métodos multivariados (AMMI y SREG) la estabilidad y adaptación de 10 líneas de maíz de alto potencial de

rendimiento y de sus híbridos obtenidos al realizar las cruzas simples posibles entre ellas.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon 10 líneas de maíz de alto potencial de rendimiento derivadas de germoplasma exótico tropical, 45 híbridos de cruce simple obtenidos al realizar las cruzas posibles entre las líneas usadas, y el híbrido comercial PROMESA como testigo (HT), el cual es de origen trilineal. Las líneas se seleccionaron bajo un sistema de siembra en altas densidades ($200,000 \text{ pl ha}^{-1}$) e irradiación gamma recurrente durante ocho ciclos de selección. La genealogía, rendimiento promedio de años de las líneas e híbridos se muestran en el Cuadro 2.1.

El efecto de interacción genotipo por ambiente fue medido por medio de la interacción Localidad x Año x Genotipo. Para ello, tanto líneas como híbridos fueron sembrados en Montecillo, Edo. de México durante los ciclos P-V de 2009, 2010 y 2011, en donde prevalecen condiciones de clima tipo Cw (i) B/2 (a'), templado con lluvias en verano; precipitación media anual de 655 mm; y temperatura media anual de 16.3 °C. Cada ciclo de cultivo se sembró en el mes de mayo y se aplicaron riegos de auxilio suficientes hasta el establecimiento de las lluvias. Se fertilizó con 120 kg N y 80 kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$; todo el P_2O_5 y la mitad del N se aplicó a la siembra y el resto en la escarda (30 días después de la siembra, dds). La maleza se controló con el herbicida Gesaprim Calibre 90 GDA®, aplicado 15 dds en una dosis de 3 L ha^{-1} . Los rendimientos promedios en los ciclos considerados como ambientes se muestran en el Cuadro 2.1.

El diseño experimental en los tres años de evaluación fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La parcela experimental consistió de dos surcos de 6 m de largo y 0.80 m de separación, con 40 cm entre plantas y dos plantas por mata ($62,500 \text{ plantas ha}^{-1}$). A la cosecha se obtuvo el rendimiento por parcela, y los datos fueron expresados en t ha^{-1} .

Con los datos de rendimiento, se evaluó por separado la interacción genotipo por ambiente para líneas e híbridos de cruce simple, en estos últimos se incluyó un híbrido trilineal como testigo.

Cuadro 2.1. Genotipos, genealogía y rendimiento promedio de ambientes. Montecillo, Estado de México, Primavera-Verano 2009, 2010 y 2011.

Código	Genealogía	Rdto. ton ha ⁻¹	Código	Genealogía	Rdto. ton ha ⁻¹	Código	Genealogía	Rdto. ton ha ⁻¹	
LÍNEAS									
L1	RTM-53-3-4-4-1-3-14#	7.3	H21	L3XL7	8.01	H27	L4XL7	7.3	
L2	[[Chapalote (Sin. 2) x Tuxpeño (Oax.9)]]F25	7.3	H26	L4XL6	7.9	H13	L2XL6	7.19	
L3	RTM-Comp. 1B (0.5-1.0)-5-2-3-16#	7.2	H29	L4XL9	7.88	H40	L7XL8	7.1	
L4	CRT 15R1M1-20R4M1-15R1M1-11R1M1-14R1M2-18R1M1-25R1M1-2744-24#	6.9	H3	L1XL4	7.85	H36	L6XL7	7.02	
L5	RTM-47-3-1-2-3-2-17#		H5	L1XL6	7.8	H22	L3XL8	6.98	
L6	RTM-Comp. 1B (0.5-1.0)-1-1-3-17#	6.8	H17	L2XL10	7.79	H34	L5XL9	6.88	
L7	[[Tuxpeño (Oax. 9) x Olotillo (Chis. 81)]]F25	6.4	H6	L1XL7	7.79	H4	L1XL5	6.85	
L8	[[Blandito (Sin. 61) x Pepitilla (Mor. 102)]]F25	6.3	H35	L5XL10	7.74	H32	L5XL7	6.59	
L9	RTM-Comp. 1B (0.5-1.0)-5-3-3-2-24#	6.2	H45	L9XL10	7.7	H42	L7XL10	6.36	
L10	CRT-Comp. 1ª (0.5-1.0)-5-1-3-19#	6.1	H19	L3XL5	7.68	HÍBRIDO TRILINEAL			
HÍBRIDOS CRUZA SIMPLE									
H18	L3XL4	8.87	H2	L1XL3	7.68	HT	PROMESA	7.2	
H25	L4XL5	8.47		L3XL9	7.68				
H24	L3XL10	8.46	H15	L2XL8	7.67	AMBIENTES			
H10	L2XL3	8.4	H8	L1XL9	7.64	Código	CICLO	Líneas Rdto. t ha⁻¹	Híbridos Rdto. t ha⁻¹
H44	L8XL10	8.38	H38	L4XL10	7.62	A1	P-V 2009	7.8	8.8
H43	L8XL9	8.28	H12	L2XL5	7.57	A2	P-V 2010	6.3	7.1
H16	L2XL9	8.24	H1	L1XL2	7.54	A3	P-V 2011	5.7	6.9
H39	L6XL10	8.14	H7	L1XL8	7.49				
H37	L6XL8	8.09	H28	L4XL8	7.48				
H14	L2XL7	8.03	H31	L5XL6	7.47				
H20	L3XL6	8.02	H9	L1XL10	7.43				
H30	L4XL10	8.02	H11	L2XL4	7.37				
			H33	L5XL8	7.35				
			H41	L7XL9	7.34				

Con el modelo AMMI se obtuvo el análisis de varianza para determinar los efectos de genotipos y años, así como las interacciones. Se consideraron los dos primeros componentes principales y la representación gráfica fue obtenida por un *biplot*, el cual mostró el patrón producido por la interacción Genotipos x Años.

El modelo AMMI fue:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + E_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + e_{ij},$$

Donde: Y_{ij} es el rendimiento medio observado del genotipo i en el ambiente j ; μ es la media general; G_i es efecto de genotipo; E_j es efecto ambiental; λ_k es valor singular del k eje en el análisis de componentes principales; α_{ik} es vector propio del genotipo i para el eje k ; γ_{jk} es vector propio del ambiente j para el eje k ; n es número de componentes principales en el modelo; e_{ij} es valor del error.

Se obtuvo el gráfico GGE *biplot* que expresó el patrón producido por la interacción Genotipos x Años, se identificaron los genotipos con mayor y menor rendimiento de grano en cada año y se distinguieron los genotipos más estables en los tres años de evaluación.

El modelo SREG se utilizó con la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_i = \lambda_1 \varepsilon_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \varepsilon_{i2} \eta_{j2} + e_{ij},$$

Donde: Y_{ij} es el rendimiento medio observado del genotipo i en el ambiente j ; \bar{Y}_i es la media de los genotipos en el ambiente j ; λ_1 es valor propio del componente principal 1 (CP1); λ_2 es valor propio del componente principal 2 (CP2); ε_{i1} es score del genotipo i sobre CP1; ε_{i2} es score del genotipo j sobre el CP2; η_{j1} es score del ambiente i sobre CP1; η_{j2} es score del ambiente j sobre CP2; e_{ij} es residual.

Tanto el modelo AMMI y SREG (incluyendo las gráficas *biplots*) fueron realizados en SAS 9.1 (SAS Institute, 2004) por medio de los programas generados por Vargas y Crossa (2000).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Líneas

El análisis de varianza detectó significancia ($P \leq 0.01$) para rendimiento de grano entre Líneas, Años, y en la interacción Líneas x Años (Cuadro 2.2). Del total de la

suma de cuadrados, el efecto de Años contribuyó con 35.7%, la interacción líneas x Años con 22.6%, y el efecto de Líneas con 16.8% de la variación total. Esto indica que los efectos ambientales tuvieron mayor importancia y que causaron variaciones en el rendimiento de las Líneas. Al respecto, otros autores también encontraron que los efectos ambientales fueron los que generaron mayor variación al evaluar genotipos de maíz (Balestre *et al.*, 2009; Kandus *et al.*, 2010).

Cuadro 2.2. Suma de cuadrados del análisis de varianza AMMI para 10 líneas de maíz de alto potencial de rendimiento evaluadas en Montecillo, Estado de México. Primavera-verano 2009, 2010 y 2011.

F.V.	GL	Suma de cuadrados
Rep	3	0.48
Líneas	9	42.45**
Años	2	89.99**
Líneas x Años	18	57.18**
CP1	10	36.96**
CP2	8	20.21**
Error	87	61.68
Total	119	251.80

**P \leq 0.01; F.V.: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CP: componente principal.

Al graficar el CP1 en función del rendimiento promedio de las 10 líneas (Figura 2.1), se observa que las líneas 2, 3 y 1 tuvieron los mayores rendimientos promedios, mientras que la línea 7 presentó el rendimiento más bajo. De acuerdo con Zobel *et al.* (1998), los genotipos y ambientes con valores altos positivos o negativos del CP1 presentan una alta IGA y, consecuentemente, aquellos con valores cercanos a cero tienen poca interacción. Así, la línea 8 y 2 tuvieron valores menores de IGA; en cambio la línea 10 y el año de evaluación 2 contribuyeron en mayor grado a la interacción genotipo por ambiente.

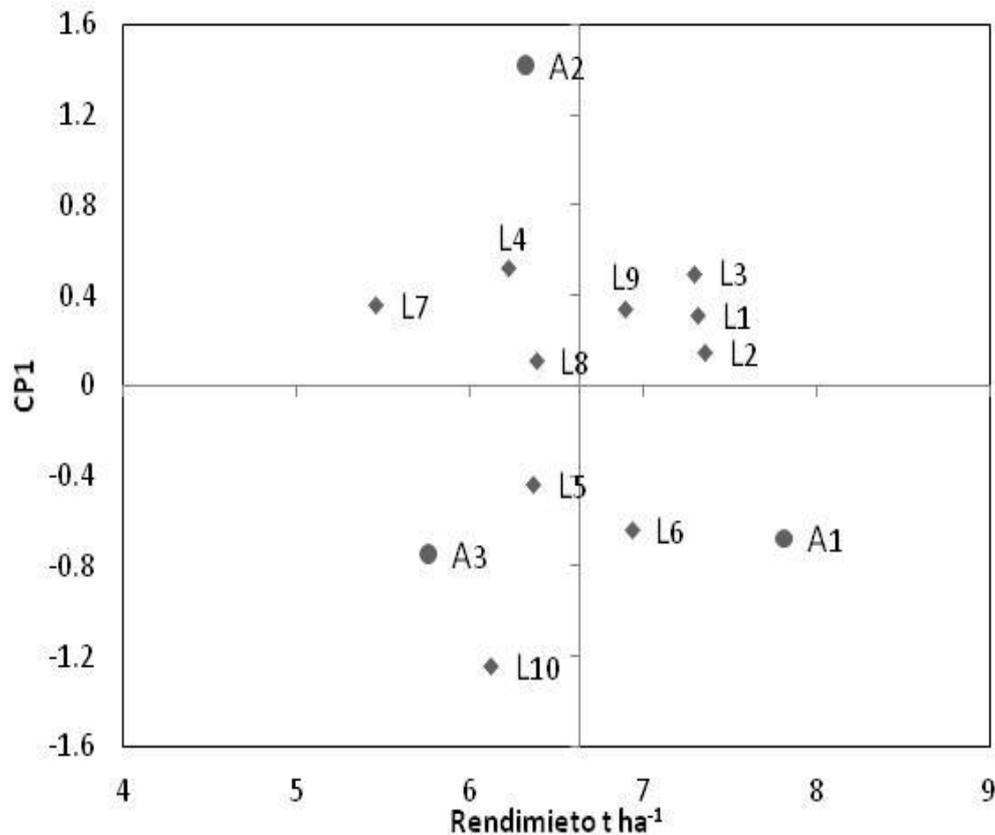


Figura 2.1. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de 10 líneas de maíz evaluadas en Montecillo, Estado de México. Primavera-Verano 2009, 2010 y 2011.

En el análisis AMMI, los dos primeros componentes principales explicaron el 100% de la variación del rendimiento (CP1 64.6% y CP2 35.4%). El biplot (Figura 2.2) muestra claramente la asociación entre las líneas y los Años de evaluación. Al respecto, Yan *et al.* (2000) señalan que los ambientes cuyos ángulos sean menores a 90° clasificarán a los genotipos de manera semejante; en este trabajo los ángulos formados entre los vectores indican que los años de evaluación fueron totalmente contrastantes, siendo el Año 2 el que generó la mayor discriminación entre los genotipos. La Línea 5 se comportó mejor en el año 3; para el Año 1 la Línea mejor adaptada fue la 6; mientras que las líneas 3 y 4 tuvieron un mejor comportamiento en el Año 2. Los genotipos más cercanos al origen tienen una menor interacción con el ambiente y son los más estables; por el contrario, los más alejados muestran una mayor variación en su comportamiento (Yan *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2005).

Así, las líneas más estables fueron la 3 y 4, mientras que la Línea 10 tuvo mayor interacción genotipo x ambiente.

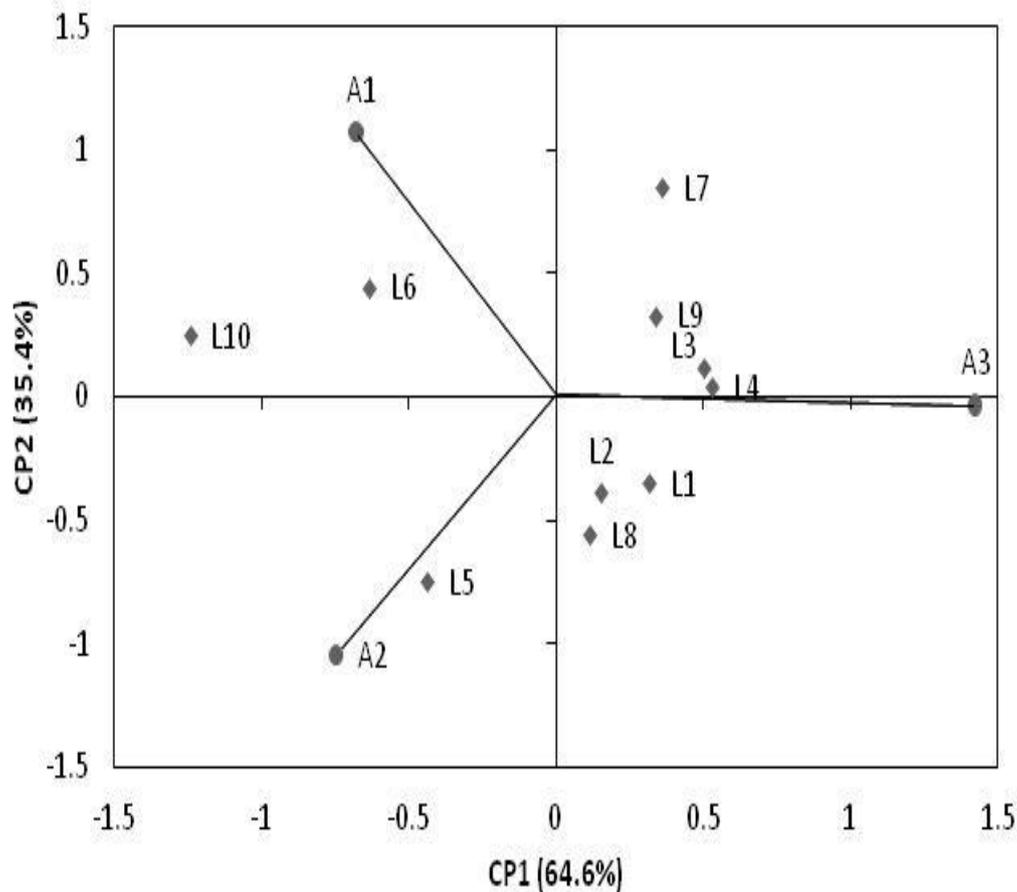


Figura 2.2. Biplot AMMI para 10 líneas de maíz de alto potencial de rendimiento. Los diamantes representan a las líneas y los vectores representan a los Años.

Con respecto al modelo SREG, en la Figura 2.3 se observa que los dos primeros componentes principales explicaron el 84% de la variación de los datos (CP1 51% y CP2 33%). Los años de evaluación fueron totalmente distintos al ubicarse en mega-ambientes diferentes. Las líneas 1, 2 y 3 tuvieron los más altos rendimientos en todos los años de evaluación; al mismo tiempo estas fueron las mejores adaptadas, a excepción de la línea 1, al observarse sus vértices dentro de los mega-ambientes I y III, donde se ubicaron los tres vectores que representan a los años considerados. Por otro lado, las líneas 10 y 7 fueron las peor adaptadas y con los más bajos rendimientos. En relación con esto, Yan *et al.* (2000) señalan que existe una alta

correlación entre adaptabilidad y rendimiento. Por otro lado, la línea 8 tuvo valores cercanos a cero para los dos componentes principales, siendo este genotipo el más estable, con un rendimiento pobre pero constante ante los cambios en el ambiente.

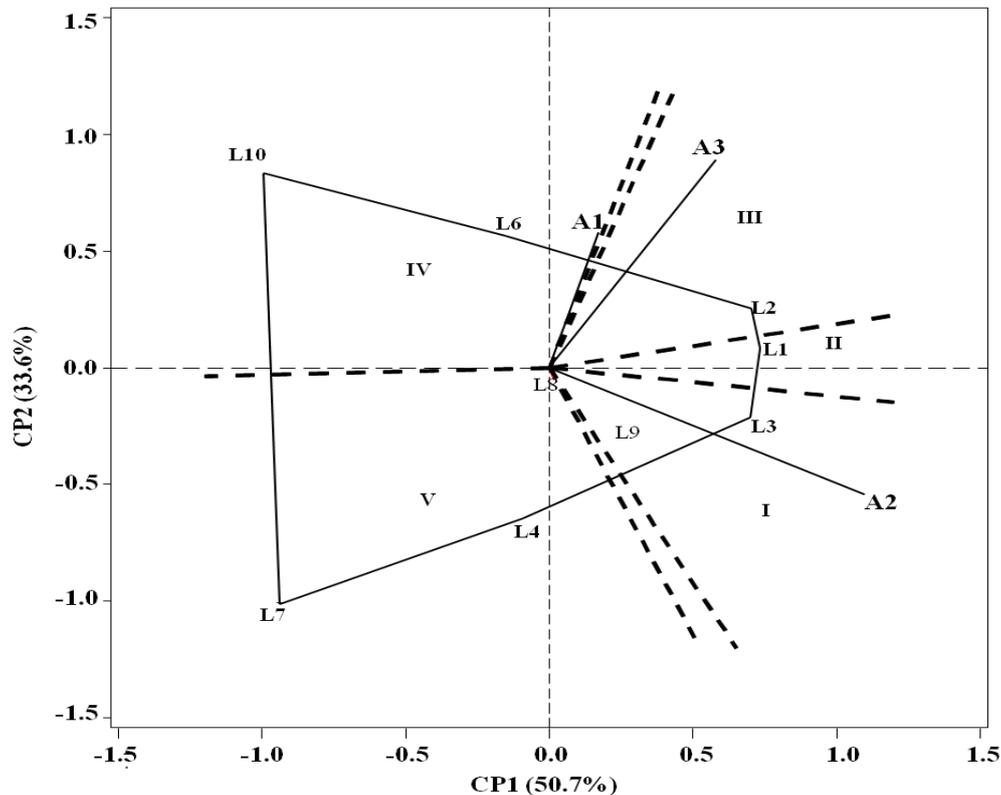


Figura 2.3. Biplot SREG para 10 líneas de alto potencial de rendimiento. Los códigos L representan a las líneas, los vectores representan a los Años, las líneas punteadas delimitan los mega-ambientes (números romanos) y los genotipos en los vértices del polígono fueron los mejor adaptados a los mega-ambientes donde se ubican.

Por otro lado, Preciado y Terrón (1996) indican que la fuerte interacción con el ambiente que presentan las líneas de maíz usadas como progenitores de híbridos de cruce simple, es una limitante para la producción de semilla. En este caso, las líneas de mayor rendimiento fueron también las mejor adaptadas a las condiciones de Montecillo en los tres años de evaluación. Esto es muy importante, ya que es un indicativo de que dichas líneas podrían utilizarse en este ambiente para la

producción de semilla sin mostrar variaciones drásticas en el rendimiento ante los cambios ambientales en cada ciclo de producción.

Híbridos

El análisis de varianza de las 45 cruzas simples más un híbrido trilineal testigo detectó significancia ($P \leq 0.01$) para rendimiento de grano entre Híbridos, Años, y en la interacción Híbridos x Años (Cuadro 2.3). La suma de cuadrados del efecto de Años contribuyó con 36.7%, la interacción Híbridos x Años con 16.74 %, y el efecto de Híbridos con 13.72% de la variación total. Al igual que en las líneas, los efectos ambientales tuvieron mayor importancia y provocaron variaciones en el rendimiento de los híbridos.

Cuadro 2.3. Suma de cuadrados del análisis de varianza AMMI para 45 cruzas simples más un híbrido trilineal testigo evaluados en Montecillo, Estado de México. Primavera-verano 2009, 2010 y 2011.

F.V.	GL	Suma de cuadrados
Rep	3	3.22
Híbridos	45	143.99**
Años	2	385.96**
Línea x Año	90	175.68**
CP1	46	129.69**
CP2	44	46.01
Error	411	339.94
Total	551	1049.50

** $P \leq 0.01$; F.V.: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CP: componente principal.

La Figura 2.4 muestra la gráfica *biplot* del CP1 en función del rendimiento promedio de los 45 híbridos de cruza simple más el testigo. Los híbridos 18 y 25 mostraron los rendimientos promedios más altos, mientras que el híbrido 42 tuvo el más bajo. En general, la mayoría de los híbridos mostraron una menor interacción con el

lado, los híbridos 16, 15 y 10 se adaptaron mejor a las condiciones del Año 1. Los genotipos más estables fueron el 21, 30, y 34, los cuales se ubicaron más próximos al origen (Yan *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2005).

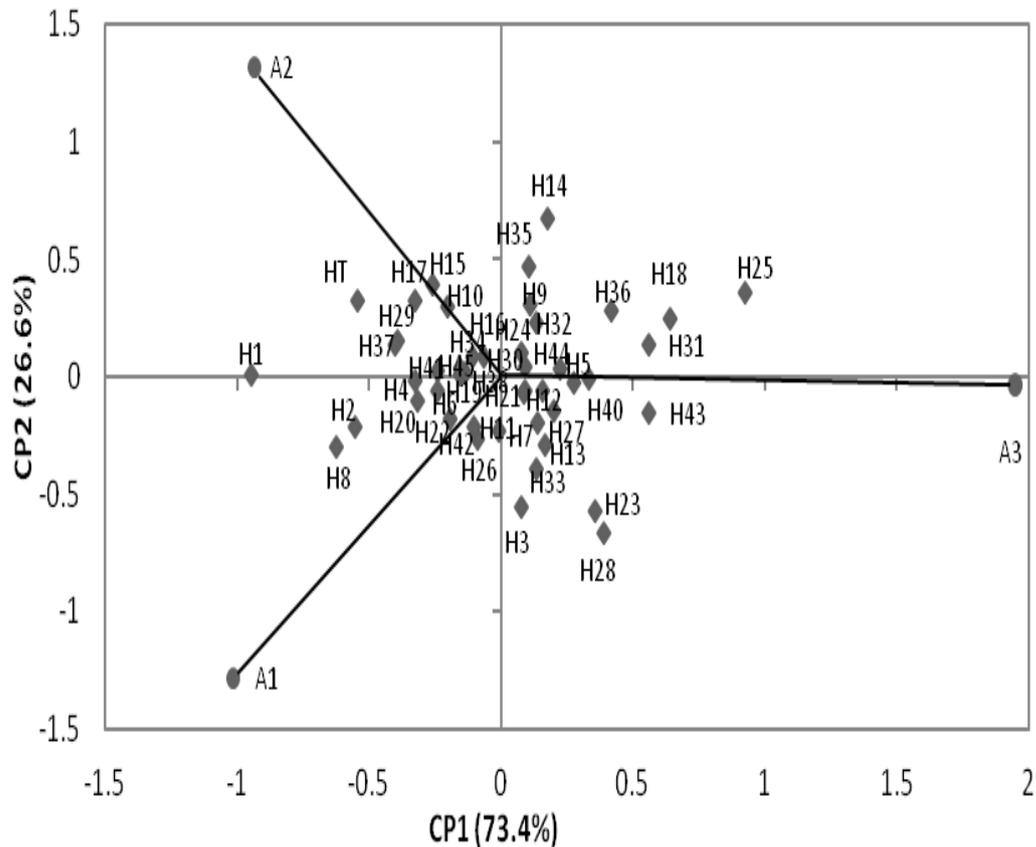


Figura 2.5. Biplot AMMI para 45 cruzas simples más un híbrido trilineal testigo. Los diamantes representan a los híbridos y los vectores representan a los Años.

Con respecto al modelo SREG, los dos primeros componentes principales explicaron el 87.3 % de la variación de los datos. El año 1 y 2 explicaron la variación sobre valores positivos de CP2, mientras que el año 3 explicó la variación sobre valores positivos de CP1 (Figura 2.6). Para el caso de los híbridos, el año 1 y 2 se comportaron de manera similar al ubicarse dentro del mismo mega-ambiente (III), mientras que el año 3 fue diferente a estos dos años. Los híbridos H18 y H25 fueron los de mayor rendimiento, mientras que los híbridos H42 y HT obtuvieron los rendimientos más bajos. El híbrido 25 fue el mejor adaptado al Año 3, mientras que el híbrido 10 se comportó mejor en los años 1 y 2. Los híbridos 38, 35 y 3 tuvieron rendimientos cercanos a la media general y mayor estabilidad.

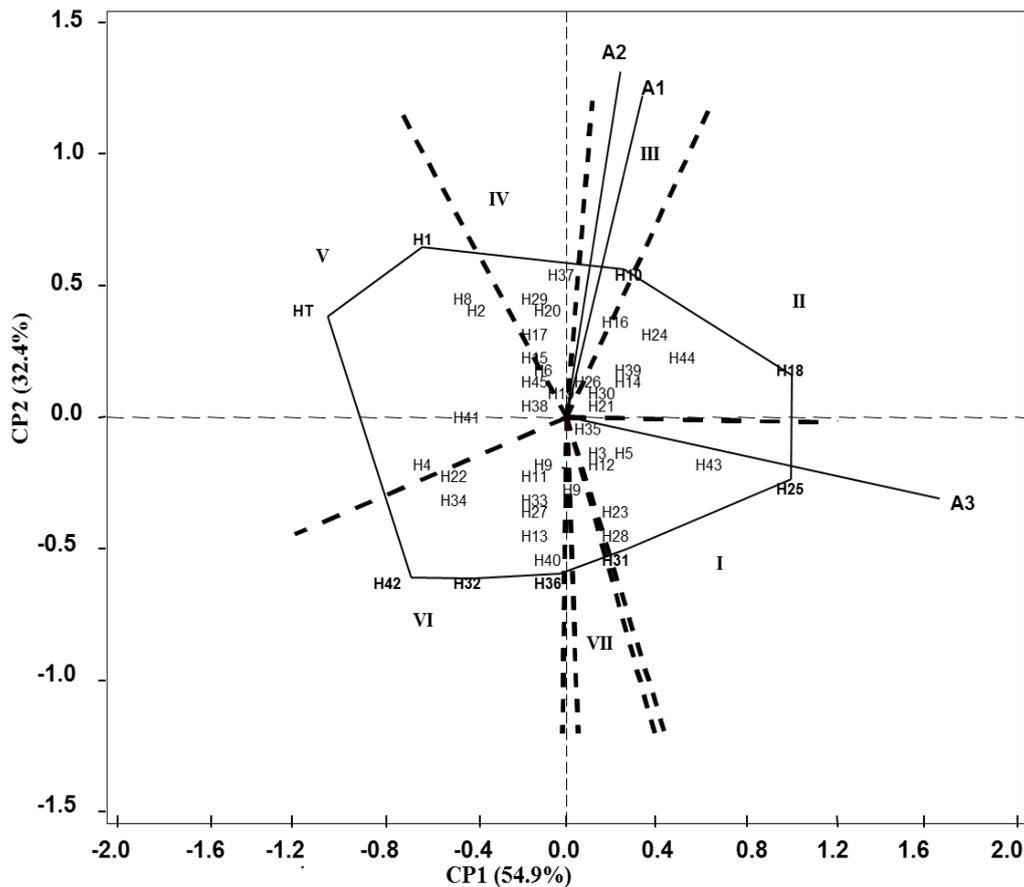


Figura 2.6. Biplot SREG para 45 híbridos de cruce simple más un híbrido trilineal testigo. Los códigos H representan a los híbridos, los vectores representan a los Años, las líneas punteadas delimitan los mega-ambientes (números romanos), y los genotipos en los vértices del polígono son los mejor adaptados a los mega-ambientes donde se ubican.

Al analizar el comportamiento de los materiales con ambos modelos, para el caso de las líneas se identificó a la Línea 8 con la mejor estabilidad de rendimiento de grano; mientras que las Líneas 7 y 10 fueron las de mayor interacción con el ambiente. En el caso de los híbridos, el híbrido H35 fue el más estable, mientras que los híbridos 45 y testigo fueron los de mayor interacción genotipo x ambiente. Sin embargo, en ambos modelos existieron diferencias al determinar qué genotipos fueron los mejor adaptados a los ambientes considerados.

En general, tanto en líneas como en los híbridos, los genotipos más estables mostraron menores rendimientos de grano, lo que coincide con lo encontrado por Balestre *et al.* (2009), quienes al evaluar híbridos de maíz encontraron que los de

mayor estabilidad mostraban un bajo rendimiento. Sin embargo, Tollenar y Lee (2002) indican que el alto rendimiento de grano y la estabilidad del rendimiento en maíz no son eventos mutuamente excluyentes.

El híbrido trilineal testigo mostró un rendimiento pobre y una mayor interacción con el ambiente comparado con la mayoría de las cruzas simples, lo que contrasta con lo que menciona Allard y Brandshaw (1964), quienes indican que poblaciones heterogéneas de maíz (cruzas dobles y trilineales) son más estables que poblaciones homogéneas (cruzas simples); no obstante, este resultado coincide con lo encontrado por Balestre *et al.* (2009), quienes identificaron cruzas simples de maíz más estables que híbridos de cruzas dobles y trilineales.

Al tratarse de una evaluación de años distintos en una misma localidad, toma importancia identificar todos los genotipos con interacción positiva con los años considerados. Los ciclos tuvieron diferencias en el comportamiento de los genotipos, siendo el Año 1 y el Año 3 los de mayor y menor rendimiento promedio, respectivamente. El modelo SREG parece ser la mejor opción en este caso, ya que tanto en líneas como en híbridos agrupó a los años en mega-ambientes y fue posible identificar plenamente a los genotipos mejor adaptados a las condiciones presentes en los años de evaluación, tanto adversas como óptimas. Los ciclos considerados como ambientes mostraron valores positivos y negativos para los componentes principales en el análisis AMMI y SREG, lo que indica, según Crossa *et al.* (1990), que la variación ambiental en la localidad (Montecillo) es muy fuerte, por lo que es recomendable incluir diferentes ambientes en futuras evaluaciones. Por otro lado, Lin y Binns (1988) señalan que cuando la variación causada por factores impredecibles del ambiente en una misma localidad no se puede controlar, se debe confiar en la capacidad homeostática del propio genotipo.

El análisis IGA mostró diferencias entre el modelo AMMI y SREG, tanto en líneas como en los híbridos. Al respecto, Kandus *et al.* (2010) mencionan que esto se debe a que en el análisis AMMI el *biplot* únicamente muestra los efectos de la interacción G x A; en cambio, en el modelo SREG el *biplot* muestra dichos efectos, pero también es posible identificar los genotipos superiores en cada ambiente. Tanto el AMMI como el SREG son ampliamente usados en la identificación de genotipos

estables y adaptados en maíz, y ambos presentan ventajas y desventajas. La elección de uno u otro modelo estará en función del objetivo y las condiciones en las que se lleve a cabo la investigación.

2.6 CONCLUSIONES

Existieron diferencias entre las líneas, entre los híbridos, y entre líneas e híbridos para rendimiento, adaptación y estabilidad. En general, las cruzas simples interaccionaron menos con el ambiente que las líneas progenitoras. El modelo AMMI identificó que la mayor variación entre los genotipos fue causada por el efecto ambiental. Tanto en el análisis AMMI como en el SREG fue posible determinar que la Línea 8 y el Híbrido 35 fueron los más estables, pero existieron diferencias al definir cuáles genotipos fueron los mejor adaptados a los ambientes considerados. Al medirse la interacción localidad x años x genotipo, el modelo SREG agrupó a los años y pudo identificarse plenamente a aquellos genotipos, líneas y cruzas simples, que se adaptaron mejor tanto a condiciones óptimas como adversas en una misma localidad.

2.7 LITERATURA CITADA

- Allard, R., W. and A. Bradshaw. 1964.** Implications of genotype-environment interactions in applied plant breeding. *Crop. Sci.* 4:503-507.
- Allard, R., W. and P. Hansche. 1964.** Some parameters of population variability and their implications in plant breeding. IV. Variability within agricultural varieties. *Adv. in Agron.* 281-325.
- Balestre, M., D. Candido J., V. Garcia R., D. Lunezzo R., and P. Valente M. 2009.** Yield stability and adaptability of maize hybrids based on GGE analysis characteristics. *Crop. Breed. Appl. Biotechnol.* 9: 219-228.
- Becker, H., C. and J. León. 1988.** Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding.* 101:1-23.
- Crossa, J., H. G. Gauch, Jr., and R. W. Zobel. 1990.** Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Sci.* 30:493-500.

- Ebehart, S., A. and W. Russell. 1966.** Stability parameters for comparing varieties. *Crop. Sci.* 6:36-40.
- Finlay, K. W, and G. N. Wilkinson. 1963.** The analysis of adaptation in plant breeding programme. *Austr. J. Agric. Res.* 14: 742-754.
- Gabriel, K., R. 1977.** Biplot display of multivariate matrices whit applications to principal components analysis. *Biometrika*: 58:453-467.
- Hallauer A., R., M. Carena and J.B. Miranda F. 2010.** *Quantitative Genetics in Maize Breeding.* Springer-Verlag New York Inc. pp. 322-332.
- Hohls, T. 2001.** Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environmental stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica* 120:235-245.
- Kandus, M. D. Almorza and J. Salerno. 2010.** Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Int. J. Exp. Bot.* 79:39-46.
- Lin, C., S. and M. Binns. 1988.** A method for analyzing cultivar x location x year experiments: a new stability parameter. *Theor. Appl. Genet.* 76:425-430.
- Preciado O., R., y A. Terrón I. 1996.** Efectos heteróticos entre y dentro de fuentes de germoplasma de maíz a través de cruza simples emparentadas. *Agric. Tec. Mex.* 22:219-230
- Rodríguez-Pérez, E. Sahagún-Castellanos J., Villaseñor-Mir H., Molina-Galán J., y Martínez-Garza A. 2005.** La interacción genotipo x ambiente en la caracterización de áreas temporaleras de producción de trigo. *Agrociencia* 39:51-64.
- Rowe, P., R. and Andrew R. 1964.** Phenotypic stability for a systematic series of corn genotypes. *Crop Sci.* 4: 563-567
- SAS Institute Inc. 2004.** SAS OnlineDoc® 9.1.3. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Scott, G., E. 1967.** Selecting for stability of yield in maize. *Crop Sci.* 7: 549-551.
- Tollenar, M., and Lee E. 2002.** Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research.* 75: 161- 169.
- Vargas, M., and J. Crossa. 2000.** The AMMI Analysis and Graphing the Biplot. Biometrics and Statistics Unit, CIMMYT. México. 42 p.
- Yan, W., L. A. Hunt, Q. Sheng, and Z. Szlavnics. 2000.** Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Sci.* 40: 597-605.

Zobel, R. W., M. Wright, and H. G. Gauch Jr. 1998. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80: 88-397.

CONCLUSIONES GENERALES

- Las 10 líneas evaluadas tuvieron rendimientos promedios superiores a las 3 t ha⁻¹, lo que indica que serían rentables para emplearse como progenitores femeninos de híbridos de cruce simple en Montecillo.
- Las líneas de efectos positivos de ACG, fueron también las de mejor comportamiento *per se* y presentaron buena adaptación a las condiciones del ambiente de prueba; además mostraron una baja interacción con el ambiente (estabilidad).
- Las cruzas simples L3xL4 y L4xL5 igualaron el rendimiento de los mejores híbridos testigos y resultaron más precoces; estos genotipos fueron los mejor adaptados a las condiciones de Montecillo, sin embargo tuvieron una alta interacción con el ambiente (poca estabilidad).
- Las líneas de mayor rendimiento tuvieron una menor interacción con el ambiente, en cambio las de menor rendimiento promedio tuvieron valores altos de IGA.
- Las cruzas simples fueron más estables que sus líneas progenitoras.
- De este trabajo se puede inferir que en líneas de maíz de alto rendimiento existe una alta correlación positiva entre efectos de ACG, comportamiento *per se* y adaptación; y que la estabilidad de los genotipos puede asociarse a menores rendimientos de grano en maíz.

LITERATURA GENERAL CITADA

- Arulselvi S., and B. Selvi. 2010.** Grain yield stability of single cross maize (*Zea mays* L.) hybrids over three different environments. *Electron. J. Plant. Breed.* 1: 577-584.
- Balestre, M., D. Candido J., V. Garcia R., D. Lunezzo R., and P. Valente M. 2009.** Yield stability and adaptability of maize hybrids based on GGE analysis characteristics. *Crop. Breed. Appl. Biotechnol.* 9: 219-228.
- Cervantes S., T., M. Oropeza R., y D. Reyes L. 2001.** Selección para rendimiento y heterosis de líneas endogámicas de maíz irradiado. *Agrociencia* 34:421-431.

- Donnet L., D. López, J. Arista, F. Carrión, V. Hernández y A. Gonzalez. 2012.** El potencial de mercado de semillas mejoradas de maíz en México. CIMMYT. México. pp. 1-2.
- Dudley J., W. 1984.** A method for identifying populations containing favorable alleles not present in elite germplasm. *Crop Sci.* 24: 1053-1054.
- Ebehart, S., A. and W. Russell. 1966.** Stability parameters for comparing varieties. *Crop. Sci.* 6:36-40.
- Espinosa C., A., M. Sierra M., y N. Gómez M., 2003.** Producción y Tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agron. mesoam.* 14:117-121.
- Fan, X.M., M.S. Kang, H. Chen, Y. Zhang, J. Tan & C. Xu. 2007.** Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agron. J.* 99: 220-228.
- Finlay, K. W, and G. N. Wilkinson. 1963.** The analysis of adaptation in plant breeding programme. *Austr. J. Agric. Res.* 14: 742-754.
- Griffing B. 1956.** Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9:463-493
- Hallauer A., R., M. Carena and J.B. Miranda F. 2010.** Quantitative Genetics in Maize Breeding. Springer-Verlag New York Inc. pp. 322-332.
- Hohls, T. 2001.** Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environmental stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica* 120:235-245.
- Kandus, M. D. Almorza and J. Salerno. 2010.** Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Int. J. Exp. Bot.* 79:39-46
- Kempthorne O., and R. Curnow N. 1961.** The partial diallel cross. *Biometrics* 17:229-250
- Luna M., B., A. Hinojosa R., O. Ayala G., F. Castillo G. y J. Mejia C. 2012.** Perspectivas de desarrollo de la industria semillera de maíz en México. *Rev. Fitotec. Mex.*35:1-7.
- Márquez S., F. 1988.** Genotécnia Vegetal. Tomo II (métodos, teoría y resultados). AGT EDITOR, S.A. México. pp. 472-473.

- Mendes A., A., L. Carlini-Garcia., A. Resende S., M. Figueireido S., A. Franco G., and C. Lopes S. 2003.** Combining ability of inbred lines of maize and stability of their respective single-crosses. *Sci. Agric.* 60: 83-89.
- Preciado O., R., y A. Terrón I. 1996.** Efectos heteróticos entre y dentro de fuentes de germoplasma de maíz a través de cruza simples emparentadas. *Agric. Tec. Mex.* 22:219-230.
- Rowe, P., R. and Andrew R. 1964.** Phenotypic stability for a systematic series of corn genotypes. *Crop Sci.* 4: 563-567
- Sprague G., F., and S. Eberhart A. 1977.** Corn and Corn Improvement. American Society of Agronomy. Madison , W. pp: 305-363
- Sprague G., F., and A. Tatum L. 1942.** General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34:923-32.
- Zobel, R. W., M. Wright, and H. G. Gauch Jr. 1988.** Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80: 88-397.