



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

PRODUCTIVIDAD DE GRANO Y SEMILLA DE HÍBRIDOS TRILINEALES, CRUZAS SIMPLES ADROESTERILES Y FÉRTILES DE MAÍZ

ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS

T E S I S

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

HÍBRIDOS TRILINEALES, CRUZAS SIMPLES ANDROESTERILES Y FÉRTILES DE MAÍZ.

Realizada por el alumno: ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS
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
GENETICA


CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. JOSÉ APOLINAR MEJÍA CONTRERAS

DIRECTOR DE
TESIS



DR. ALEJANDRO ESPINOSA CALDERÓN

ASESOR



DR. JOSÉ JESÚS GARCÍA ZAVALA

ASESOR



M. C. MARGARITA TADEO ROBLEDO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2014

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo Mexicano.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado en el transcurso de mis estudios de Postgrado (Maestría en Ciencias).

Al Colegio de Postgraduados, PREGEP-Genética, junto con el personal académico de este postgrado, que ayudó a mi formación profesional.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT IT201312-3), por su colaboración al proporcionar los materiales necesarios para el establecimiento, manejo y cosecha de los experimentos en las diferentes localidades.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, en el Campo Experimental Valle de México (INIFAP-CEVAMEX), y a la Universidad Nacional Autónoma de México, en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, por proporcionarme el espacio en sus parcelas para el establecimiento de mi trabajo de tesis.

A los miembros de mi consejo particular: Dr. José Apolinar Mejía Contreras, Dr. Alejandro Espinosa Calderón, Dr. José Jesús García Zavala y a la M. C. Margarita Tadeo Robledo. Por su muy valiosa enseñanza, orientación, sugerencias, motivación, dirección y correcciones emitidas durante la realización de esta investigación y que mejoraron este importante trabajo.

Al Dr. Fernando Castillo Gonzáles por su colaboración en los análisis estadísticos.

A los integrantes del Equipo de trabajo del Laboratorio de Semillas de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de Ingeniería Agrícola, por su apoyo incondicional en la elaboración de este trabajo.

A los Ingenieros Agrícolas Israel Arteaga Escamilla y Beatríz Martínez Yáñez, por su apoyo en todas las actividades del ciclo de cultivo de esta investigación.

A la Secretaria del Postgrado de Genética, la Señora Dalila, a mis compañeros y amigos que me apoyaron a la elaboración y conclusión de esta investigación.

DEDICATORIAS

A mis padres, Juana Islas Fernández y Rosalio Canales Castro.

A mis hermanos, Armando y Montserrat.

A toda mi familia, por su incondicional apoyo moral para concluir este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros.

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN GENERAL	ix
GENERAL SUMMARY	xi
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
II. PRODUCTIVIDAD DE GRANO Y SEMILLA DE HÍBRIDOS TRILÍNEALES, CRUZAS SIMPLES ANDROESTERILES Y FÉRTILES DE MAÍZ	6
2.1 Resumen.....	6
2.2 Summary.....	7
2.3 Introducción.....	8
2.4 Materiales y métodos.....	10
2.5 Resultados y discusión.....	12
2.6 Conclusiones.....	23
2.7 Literatura citada.....	24
III. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE GRANO EN HÍBRIDOS TRILÍNEALES Y CRUZAS SIMPLES DE MAÍZ PARA LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO	27
3.1 Resumen.....	27
3.2 Summary.....	28
3.3 Introducción.....	29
3.4 Materiales y métodos.....	32
3.5 Resultados y discusión.....	37
3.6 Conclusiones.....	58
3.7 Literatura citada.....	59
IV. DISCUSIÓN GENERAL	63
V. CONCLUSIONES GENERALES	66
VI. REVISIÓN DE LITERATURA GENERAL	68

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 2.1. Cuadros medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado para diversas variables de cuatro híbridos de maíz evaluados en dos densidades de población y cuatro ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2012.	12
Cuadro 2.2. Comportamiento medio de cuatro híbridos de maíz considerando el promedio de las versiones Fértiles y Androestériles, en cuatro ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Ciclo Primavera – Verano 2012.	14
Cuadro 2.3. Comportamiento medio de los ambientes evaluados para rendimiento (kg ha^{-1}), altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Cuautitlán-UNAM y Santa Lucía-INIFAP, ciclo Primavera – Verano 2012.	15
Cuadro 2.4. Comportamiento medio para dos densidades de población considerando la media de cuatro híbridos evaluados en versiones fértiles y androestériles, para rendimiento (kg ha^{-1}), floración masculina y femenina, altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Ciclo Primavera – Verano 2012.	16
Cuadro 2.5. Comportamiento medio de cuatro proporciones de semilla Androestéril y Fértil considerando la media de cuatro híbridos evaluados en dos densidades de población y cuatro ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), floración masculina y femenina, altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Ciclo Primavera – Verano 2012.	18
Cuadro 3.1. Descripción de los diferentes ambientes de prueba para los híbridos trilineales.	33
Cuadro 3.2. Descripción de los diferentes ambientes de prueba para las cruzas simples.	34
Cuadro 3.3. Análisis de varianza AMMI para cuatro híbridos evaluados en ocho ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	38
Cuadro 3.4. Rendimiento medio en kg ha^{-1} de cuatro genotipos de maíz evaluados en ocho ambientes y valores de los dos primeros componentes principales para genotipos y ambientes. FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	40

Cuadro 3.5.	Análisis de varianza de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell para cuatro híbridos de maíz evaluados en cuatro ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	43
Cuadro 3.6.	Rendimiento medio, coeficiente de regresión (b_i), desviaciones de regresión (δ_{di}^2) de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell de cuatro híbridos evaluados en cuatro ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	44
Cuadro 3.7.	Comportamiento medio del rendimiento en los ocho ambientes evaluados, componente principal uno (CP1) e índices ambientales. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	46
Cuadro 3.8.	Comportamiento medio del rendimiento de los cuatro híbridos evaluados, componente principal uno (CP2) y coeficiente de regresión. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	47
Cuadro 3.9.	Análisis de varianza AMMI para cinco cruza simples evaluadas en dieciséis ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	48
Cuadro 3.10.	Rendimiento medio en kg ha ⁻¹ de cinco cruza simples de maíz evaluadas en dieciséis ambientes y valores de los dos primeros componentes principales para genotipos y ambientes.	51
Cuadro 3.11.	Análisis de varianza de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell para cinco cruza simples evaluadas en dieciséis ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	54
Cuadro 3.12.	Rendimiento medio, coeficiente de regresión (b_i), desviación de regresión (δ_{di}^2) de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell de las cinco cruza simples evaluadas en dieciséis ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	55
Cuadro 3.13.	Comportamiento medio del rendimiento en los dieciséis ambientes evaluados, componente principal uno (CP1) e índices ambientales. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	56
Cuadro 3.14.	Comportamiento medio del rendimiento de las cinco cruza simples evaluadas, componente principal uno (CP1) y coeficiente de regresión. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Comportamiento medio del rendimiento (kg ha^{-1}) de las cuatro proporciones de semilla evaluadas en los cuatro genotipos, bajo dos densidades de población probadas en cuatro ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2012.	20
Figura 2.2. Comportamiento medio del rendimiento (kg ha^{-1}) de cuatro híbridos evaluados en cuatro ambientes, bajo dos densidades de población y versiones fértiles y androestériles. Ciclo Primavera – Verano 2012.	22
Figura 3.1. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de cuatro híbridos trilineales de maíz evaluados en ocho ambientes en la FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012. Los círculos representan los genotipos y los rombos a los ambientes.	41
Figura 3.2. Biplot AMMI para cuatro híbridos trilineales de maíz. Los puntos representan a los híbridos trilineales y los vectores representan a los ambientes.	42
Figura 3.3. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de cinco cruza simples evaluados en dieciséis ambientes en la FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012. Los círculos representan a los genotipos y los rombos representan a los ambientes.	50
Figura 3.4. Biplot AMMI para cinco cruza simples. Los puntos representan a los híbridos trilineales y los vectores representan a los ambientes.	53

RESUMEN GENERAL

PRODUCTIVIDAD DE GRANO Y SEMILLA DE HÍBRIDOS TRILÍNEALES, CRUZAS SIMPLES ANDROESTERILES Y FÉRTILES DE MAÍZ

ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS, M. C.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2014

En los programas de mejoramiento genético de maíz (*Zea mays* L.) y de generación de híbridos de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-CEVAMEX), se emplean la esterilidad masculina y la incorporación de este carácter, en las líneas élites como una alternativa para facilitar la producción de semillas, favorecer el mantenimiento de la calidad genética, y disminuir costos de producción de semilla, al liberarse comercialmente para su uso extensivo y abastecimiento de semilla de nuevos híbridos. En estos programas, desde 1992, se trabaja con androesterilidad, contándose con híbridos trilíneales, para productores de maíz de los Valles Altos de México (2200 a 2600 msnm), cuyos progenitores tienen el carácter de androesterilidad. Con base en ello, se consideró necesario evaluar un grupo de híbridos trilíneales así como las cruas simples progenitoras, para definir la estabilidad del rendimiento, y determinar la interacción genotipo x ambiente de los híbridos en diferentes ambientes de prueba, con el propósito de establecer una recomendación adecuada y apoyar su liberación comercial en ambientes específicos. Adicionalmente, para estos híbridos se tuvo como objetivos, en un trabajo paralelo, a) definir la capacidad productiva de estos híbridos trilíneales de maíz, en sus versiones androestéril y fértil; b) determinar la mejor proporción de mezcla de semilla androestéril (AE) y fértil (F), bajo dos densidades de población (50 000 y 70 000 plantas por hectárea); c) identificar a los híbridos trilineales y sus cruas simples progenitoras que tuvieran mejor estabilidad del rendimiento de grano, utilizando para ello los Parámetros de Estabilidad de Eberhart y Russell, y

el modelo AMMI, y d) definir al modelo que mejor describa la interacción genotipo por ambiente para poder lo recomendar la liberación comercial de los híbridos trilineales. En el análisis de varianza para rendimiento, se obtuvieron diferencias altamente significativas para ambientes, genotipos y densidades; en la interacción Genotipo x Ambiente resultó significativa. Los mejores rendimientos los tuvo el híbrido H-53, con 7438 kg ha⁻¹; mientras que el ambiente con el mejor rendimiento fue Cuautitlán Izcalli en la segunda fecha de siembra. La mejor densidad de población fue 70 000 plantas por hectárea. Las proporciones de semilla 33%AE y 67%F, con 6290 kg ha⁻¹; y 66%AE y 34%F con 6200 kg ha⁻¹, fueron mejores que otras mezclas de semilla androestéril y fértil y que la versión 100% fértil. En la parte de la evaluación de la estabilidad y la interacción genotipo x ambiente, el modelo AMMI identificó como estables a los híbridos trilineales H-57 y Puma 1183 AEC2, así como a las cruzas simples H-57 AE y H-57 F; en cuanto a los parámetros de estabilidad los híbridos trilineales H-53, Puma 1183 AEC1 y Puma 1183 AEC2, y las cruzas simples H-57 AE, Puma 1183 AEC1 AE, y Puma 1183 AEC1 F resultaron estables. Los niveles de correspondencia entre ambos modelos, para los híbridos trilineales y las cruzas simples, fue del 50% y 20%, respectivamente. Ambos modelos identificaron por lo menos a un híbrido trilineal y una craza simple, como estable. Se concluye que el modelo AMMI describió mejor la interacción genotipo por ambiente.

Palabras clave: *Zea mays* L., androesterilidad, densidad de población, producción de semillas, híbridos de maíz, proporciones de semilla, parámetros de estabilidad, AMMI, rendimiento.

GENERAL SUMMARY

GRAIN AND SEED PRODUCTIVITY OF SINGLE AND THREE-WAY AND SINGLE CROSSES OF ANDROESTERILE AND FERTILE MAIZE

ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS, M. C.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2014

The maize (*Zea mays* L.) breeding project and the hybrid development program the Faculty of Superior Studies Cuautitlan (FESC-UNAM) and the National Institute for Forestry, Agricultural and Animal Research (CEVAMEX-INIFAP) uses the male sterility system for the incorporation of this character to the elite inbred lines. This alternative facilitates the production of seed and also favored the maintenance of the genetic quality and lowered the cost of seed production on commercial maize released for extensive use and for seed supplying of new hybrids. Since 1992, the project has developed three-way hybrids to be grown by maize farmers for the High Valleys of Mexico (2200-2600 meters above sea level), whose parents have the character of male sterility. Based on this, it was necessary to assess a group of three-way maize hybrids as well as single crosses in order to study their yield stability, and genotype x environment interaction of hybrids across different test environments to establish a proper recommendation and to support their commercial release to specific environments. Other objective of this work were: a) to study the productivity potential of the androsterile and fertile versions of the hybrids; b) to determine the best proportion of male-sterile (MS) and fertile (F) seed mixtures, under two plant densities (50 000 and 70 000 plants per hectare); c) to identify the best hybrids and their progenitor single crosses with the best grain yield stability by means of the Eberhart and Russell's parameters of stability, and the AMMI model, and d) to define the model that best describes the genotype by environment interaction, allowing to recommend the commercial release of the three-way maize hybrids. For the analysis of variance for yield, there were highly significant differences among

environments, genotypes and densities for grain yield and that the genotype x environment interaction was significant. The hybrid H-53 had the highest yield, 7438 kg ha⁻¹, and the best environment was Cuautitlán Izcalli in the second planting date. The best population density was 70,000 plants per hectare. The best mix proportions of seed were 33% MS and 67 %F, with 6,290 kg ha⁻¹; and the mix of 66% MS and 34 %F, with 6,200 kg ha⁻¹. For the evaluation of the stability and genotype x environment interaction, the model AMMI identified to the three-way Hybrids H-57 and Puma 1183 AEC2, and the single crosses H-57 AE and H-57 F, as the stablest ones. Considering the stability parameters, the three-way hybrids H-53, Puma 1183 1183 AEC1 and Puma AEC2, and the single crosses H-57 AE, 1183 AEC1, AE and Puma 1183 F AEC1 were considered as stables. The levels of correspondence between the two models, for the three-way hybrids and the single crosses were 50% and 20%, respectively. Both models at least identified one three-way and one single cross hybrid as stable. It is concluded that the AMMI model described better the genotype by environment interaction.

Key words: *Zea mays* L., male sterility, plant density, seed production, maize hybrids, seed ratios, parameters of stability, AMMI, yield.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La importancia de hacer investigación del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en México, se fundamenta por su relevancia en la alimentación, su superficie de siembra anual, así en como aspectos culturales, sociales, económicos y políticos, entre otros factores relacionados con el cultivo, además se considera a México como centro de origen, de domesticación, y de diversidad del maíz, especie que constituye ciertamente el componente principal de la dieta de la población, pues su consumo *per cápita* es de 160 kg al año.

En México se cultivan anualmente 8.5 millones de hectáreas de maíz, con una producción nacional de 22.5 millones de toneladas y una media de 2.8 ton ha⁻¹ (Turrent, 1994; Ortiz *et al.*, 2007; Turrent, 2009). De la superficie nacional cultivada, 1.5 millones de hectáreas se ubican en altitudes de 2 200 a 2600 m, en los Valles Altos de la Mesa Central; siendo 800 mil de temporal estricto, el cual generalmente se presenta en forma tardía o errática, limitando con ello la fecha de siembra, la productividad del cultivo, y la superficie sembrada y cosechada. Particularmente en el estado de México, se siembran 500 mil ha de maíz, en 300 mil de ellas, la productividad es limitada (1.2 t ha⁻¹), por el temporal escaso y fecha de siembra tardía, y por la incidencia de heladas tempranas (Avila *et al.*, 2009; Espinosa *et al.*, 2010 a).

En lo que se refiere al uso de variedades mejoradas en los Valles Altos de México, sólo el 6% de la superficie sembrada de maíz se hace con semilla certificada (Espinosa *et al.*, 2012), situación desafortunada, ya que se ha demostrado que con el uso de variedades mejoradas los productores se benefician con el incremento de la producción y de manera económica al comercializar sus productos excedentes.

En la actualidad, los programas de mejoramiento genético de maíz de las diferentes empresas semilleras y de las instituciones de investigación pública, tienen como objetivo generar

y liberar híbridos trilineales en mayor proporción, debido a ventajas en el costo de producción de este tipo de híbridos, así como por las facilidades en la producción de semilla y control de calidad, con respecto a los híbridos de cruza doble; adicionalmente, los híbridos trilineales generalmente presentan mejor rendimiento, respecto a los híbridos de cruza doble, e interaccionan menos con el ambiente que los híbridos de cruza simple, lo que es favorable para los productores de maíz.

En México, la principal institución pública dedicada a la investigación sobre el mejoramiento genético del maíz y sus paquetes tecnológicos, para tratar de dar solución a los problemas que se presentan en el campo mexicano, es el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), el cual inició en 1985, que junto con sus instituciones antecesoras, como el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), 1961 a 1985, el Instituto de Investigaciones Agrícolas (IIA), la Oficina de Estudios Especiales (OEE), de 1943 a 1961, generaron y desarrollaron más de 270 variedades e híbridos de maíz (Espinosa *et al.*, 2003; Espinosa *et al.*, 2004; Espinosa *et al.*, 2008 a, Espinosa *et al.*, 2008 b). Otras instituciones como la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, dependiente de la UNAM, realizan mejoramiento genético en maíz, y han ofrecido variedades mejoradas para los Valles Altos de México (Tadeo *et al.*, 2003, Espinosa *et al.*, 2008 a), ahí también se realiza desde 1992, investigación incorporando la esterilidad masculina, a las líneas progenitoras élite de los híbridos de mayor importancia, generados en la propia Universidad e INIFAP, respectivamente (Tadeo *et al.*, 2001; Tadeo *et al.*, 2003; Espinosa *et al.* 2010 b).

El objetivo principal de la esterilidad masculina en la producción de semilla híbrida de maíz es, facilitar el incremento de semilla y favorecer el mantenimiento de la calidad genética de las semillas, y que su utilización de los híbridos generados para los Valles Altos de México, en particular permitan reducir los costos de producción.

Una de las formas de aprovechar la esterilidad masculina del maíz en forma comercial, es el uso de mezclas de semillas androesteriles y fértiles, de tal manera que, se produce semilla con la versión de hembra androestéril en cierto porcentaje, que generalmente es del orden del 60 al 80% de la superficie; en el otro porcentaje, se utiliza hembra con fertilidad normal, isogénica; en ese caso a las plantas se les desespiga, es decir, se eliminan las espigas antes de que liberen polen, no así a las hembras androestériles. De esta manera, se cosecha la semilla, la cual, en ambos casos fue polinizada por el macho común. Después se beneficia la semilla, se seca, se selecciona, se desgrana, y se clasifica, hasta tener lista esta mezcla, para envasarse, lo que significa que el productor en su parcela, tendrá una proporción similar de plantas androestériles del 60 al 80% y el resto sería de plantas de fertilidad normal. La mejor proporción de la mezcla de semillas se define a través de experimentos con diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil (Espinosa *et al.*, 2009).

Por otro lado, una ventaja, entre otras, que ofrece el uso de variedades mejoradas con el carácter de androesterilidad, es que los rendimientos de los genotipos con esterilidad masculina pueden ser más altos que los rendimientos de los genotipos con fertilidad masculina desespigados, ya que el proceso de desespigue causa con frecuencia daños a las plantas, reduciendo la producción. Además, la energía que normalmente se consume en la formación de polen puede derivarse hacia la producción de semilla (Poehlman, 2005; Uhart y Andrade, 1995).

Con respecto al componente genotipo x ambiente, en los programas de mejoramiento genético, es necesario considerar a la adaptación, la estabilidad y la expresión de los mejores rendimientos de los genotipos que se evalúan como criterios de selección en los diferentes ambientes de prueba, porque, como ya se mencionó, las condiciones limitantes en los Valles Altos de México como la precipitación, la presencia de heladas tempranas y los diferentes tipos de suelo existentes, hacen que cada uno de los genotipos evaluados tengan respuestas diferentes a

cada estímulo ambiental. Así, los productores de semilla y grano de maíz de los Valles Altos de México en particular, necesitan material genético que tenga un buen comportamiento en sus parcelas de cultivo, donde las situaciones generalmente suelen ser muy diferentes a las condiciones experimentales, de manejo y ambientales. Por lo anterior, es necesario hacer las evaluaciones de los genotipos en diversos ambientes.

En relación con lo anterior, Becker (1981) propuso el concepto agronómico de variedad estable, el cual dice que una variedad estable, es aquella que presenta una mínima interacción genotipo ambiente, asociando dicho concepto con la pretensión de obtener un incremento del rendimiento en respuesta a mejoras ambientales.

La interacción genotipo x ambiente es un efecto genético-ambiental que puede contribuir al valor fenotípico de los individuos, y que usualmente ocurre en experimentos donde se trabaja con caracteres de tipo cuantitativo, por lo que se requiere de las mejores herramientas genético-estadísticas para su mejor entendimiento e interpretación (Eeuwijk, 2006). Así pues, la interacción genotipo x ambiente, se conoce como la respuesta diferencial de los genotipos a través de los diferentes ambientes de prueba.

Para el estudio de la interacción genotipo por ambiente en maíz, se ha trabajado con modelos univariados como los de Finlay y Wikilson (1963), y Eberhart y Russell (1966), los cuales se basan en el uso de desviaciones de regresión para determinar la estabilidad de rendimiento, a partir de una regresión lineal. Sin embargo, estos modelos no satisfacen por completo la explicación de la interacción genotipo x ambiente, ya que no indican cuales son los genotipos o los ambientes que generan la interacción. En contraste, actualmente se cuenta con modelos multivariados que pueden ayudar a la identificación de los genotipos o los ambientes que más contribuyen a la interacción genotipo x ambiente. Uno de esos modelos el AMMI, que como indica Alberts (2004), este combina el análisis de varianza para los efectos principales del

genotipo y el ambiente con análisis de componentes principales de la interacción genotipo por ambiente y ha demostrado ser útil para la comprensión de la compleja interacción genotipo por ambiente. Los resultados de tal modelo pueden ser graficados en un biplot, el cual muestra efectos principales y de interacción para los genotipos y los ambientes. El modelo AMMI combina análisis de varianza (ANOVA) y parámetros aditivos y multiplicativos en un solo modelo.

Con base a lo mencionado líneas arriba, los objetivos e hipótesis que se plantearon en este trabajo fueron los siguientes:

1) Estudiar la capacidad productiva de cuatro híbridos trilineales de maíz con el carácter de androesterilidad, en la producción de semillas, así como determinar la mejor proporción de mezclas de semilla androestéril y androfértil de los híbridos evaluado, esto bajo diferentes densidades de población y diferentes proporciones de semilla, para la conformación de un híbrido final, y para establecer el porcentaje de la mezcla de semilla fértil y androestéril, para uso comercial. Como hipótesis se planteó que las proporciones de semilla androesteril más altas tendrían un mayor rendimiento que las proporciones de semilla fértil más altas.

2) Identificar híbridos trilineales y cruza simples de maíz que presenten la mejor estabilidad del rendimiento de grano, mediante dos modelos para evaluar la estabilidad (Parámetros de Estabilidad de Eberhart y Russell, y AMMI), así como definir el modelo que mejor describa la interacción genotipo por ambiente. Las hipótesis planteadas en el segundo estudio, fueron: que al menos un híbrido trilineal y una cruza simple que presentan estabilidad en rendimiento de grano y semilla, respectivamente, y que el modelo AMMI hace es mejor que el de Eberhart y Russell para estudiar e interpretar la interacción genotipo x ambiente.

II. PROPORCIONES DE SEMILLA FÉRTIL Y ANDROESTÉRIL DE CUATRO HÍBRIDOS DE MAÍZ BAJO DIFERENTES DENSIDADES DE POBLACIÓN

ANDROSTERILE AND FERTILE SEED PROPORTIONS OF FOUR MAIZE HYBRIDS UNDER DIFFERENT POPULATION DENSITIES

2.1 RESUMEN

La esterilidad masculina en maíz (*Zea mays* L.) ayuda a mantener la calidad genética de las semillas, a reducir los costos de producción de la semilla híbrida, y, a veces, aumenta el rendimiento de semilla y grano. En esta investigación se planteó como objetivo estudiar la capacidad productiva de cuatro híbridos trilíneales de maíz, en sus versiones androestéril y fértil y determinar la mejor proporción de mezcla de semilla androestéril (AE) y fértil (F), bajo dos densidades de población (50 000 y 70 000 plantas por hectárea). Se establecieron cuatro experimentos, en el ciclo primavera-verano 2012; dos en Cuautitlán Izcalli y dos en Santa Lucía, Texcoco, en dos fechas de siembra. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las fuentes de variación fueron ambientes, genotipos, densidades, proporciones de semilla y sus interacciones. En el análisis de varianza para rendimiento, se obtuvieron diferencias altamente significativas para ambientes, genotipos y densidades; en la interacción Genotipo x Ambiente hubo significancia. El mejor rendimiento lo tuvo el híbrido H-53, con 7438 kg ha⁻¹; el ambiente con el mejor rendimiento fue Cuautitlán Izcalli en la segunda fecha de siembra. La mejor densidad de población fue 70 000 plantas por hectárea. Las mejores proporciones de semilla fueron: 33%AE y 67%F con 6290 kg ha⁻¹; y 66%AE y 34%F con 6200 kg ha⁻¹. Todas las mezclas de semilla androestéril y fértil fueron superiores en rendimiento a la versión 100% fértil.

Palabras clave: *Zea mays* L., androesterilidad, densidad, híbridos trilineales, proporciones de semilla, rendimiento.

2.2 SUMMARY

Male sterility in maize (*Zea mays* L.) helps to maintain the genetic quality of the seed, to reduce the cost of hybrid seed production, and, sometimes, increases the yield of seed and grain. The objective of this research was to find out the productive capacity of four three-way hybrids of maize, in their versions of male sterile and fertile; as well to determine the best proportion of seed mixture male-sterile (MS) and fertile (F), under two population densities (50,000 and 70,000 plants per hectare). Four experiments were planted during the spring-summer 2012 season; two in Cuautitlán Izcalli and two in Santa Lucia, Texcoco, in two planting dates. A randomized complete block design with three replications was used. The sources of variations were environments, genotypes, densities, proportions of seed and their interactions. Grain yield had highly significant difference for environments, and between genotypes and densities. Also, there was significance in the interaction genotype x environment. The hybrid H-53 had the best grain yield, 7438 kg ha⁻¹. The best environment was Cuautitlán Izcalli in the second planting date. The best population density was 70,000 plants per hectare. The best proportions of seed were 33% MS and 67 % F with 6,290 kg ha⁻¹; and 66% MS and 34 % F with the 6,200 kg ha⁻¹. All the male sterile and fertile seed mixture were superior in performance to 100% fertile version.

Index words: *Zea mays* L., male sterile, density, three-way hybrids, seed production, maize grain yield.

2.3 INTRODUCCIÓN

La androesterilidad es la incapacidad que tienen las plantas para producir anteras, polen o granos de polen funcionales. Esta característica es utilizada para la producción de semilla híbrida de maíz (*Zea mays* L.), ya que favorece y mantiene la calidad genética de la semilla que se produce. Con el uso de esta característica se evita la eliminación manual de las espigas (desespigamiento) de las plantas progenitoras femeninas, actividad que requiere de 24 a 50 jornales por hectárea, lo cual tiene impacto económico al elevar los costos del sistema de producción. La efectividad del desespigamiento dependerá de la uniformidad del progenitor femenino, la presencia de hijos, y la facilidad de retirar la espiga (Jugenheimer, 1990; Tadeo *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2005). Además en la producción de semilla híbrida de maíz, el uso del esquema de la androesterilidad ayuda al productor a mantener la calidad genética del híbrido, cada vez que la incrementa semilla.

Con la finalidad de que los productores de los Valles Altos de México (2200 a 2600 metros de altitud) tengan disponibles variedades mejoradas de maíz de buena calidad, tanto de grano como de semilla, y a un menor costo económico, en comparación con las diferentes empresas semilleras, desde 1992 instituciones dedicadas a la investigación, como la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México) y el INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) han trabajado en conjunto con fuentes de esterilidad masculina, incorporando éste carácter a las líneas élite de maíz de ambas instituciones (Tadeo *et al.*, 2003), para que los híbridos de maíz que ambas instituciones generan satisfagan las necesidades de los agricultores maiceros en los Valles Altos de México.

La androesterilidad dejó de utilizarse en Estados Unidos por las empresas semilleras en la década de los setentas por la enfermedad del tizón foliar (*Bipolaris maydis*) (Simmons *et al.*, 2001) raza T, que causó una epifitía en gran parte de la faja maicera y sur de los Estados Unidos.

Al conocerse las limitaciones y riesgos por el uso generalizado de una sola fuente, la esterilidad masculina citoplásmica (CMS) tipo T (Texas), a finales de la década de los setentas y a principios de la década de los ochentas, se encontraron nuevas fuentes de esterilidad masculina citoplásmica (CMS), como la CMS tipo C (Charrua) y la CMS tipo S (USDA). De éstas, la CMS tipo T ha sido descartada por programas de mejoramiento por la susceptibilidad a *Bipolaris maydis* raza T. La CMS tipo S (USDA) es más inestable que los otros dos tipos de CMS, debido a que en su constitución genética cuenta con genes restauradores de la fertilidad (Weider *et al.*, 2009). La CMS tipo C (Charrua) tiene un genoma que es en longitud mayor que el de la CMS T, pero menos complejo que el de la CMS T (Allen *et al.*, 2007). Así pues, el uso de diferentes fuentes de CMS, ayuda a que con la variación haya menor incidencia de enfermedades.

Las formas en las que el productor de grano puede aprovechar el carácter de androesterilidad de la manera más común, es en las siguientes dos: la primera es cuando se emplea un macho al cual se le incorporó la capacidad restauradora de la fertilidad, que se encargará de polinizar y fecundar al progenitor femenino, ya sea como cruza simple o línea androestéril (todo dependerá del tipo de semilla que se desee incrementar, para formar una cruza simple o un híbrido trilineal). El resultado de utilizar este progenitor restaurador como macho polinizador, es que en la siguiente generación, se obtendrán plantas fértiles en el campo. Éste progenitor macho debe ser evaluado en varios ciclos anteriores, para comprobar que dicho progenitor posee la capacidad para restaurar la fertilidad en la siguiente generación. La segunda forma de aprovechar la androesterilidad es utilizando mezclas de semilla androestéril y fértil en diferentes proporciones, donde la proporción mayor será del progenitor femenino, el cual es portador del carácter de esterilidad masculina, la otra proporción de semilla será del mismo híbrido, el cual tendrá la función de macho androfértil, que abastecerá de polen a los estigmas de las plantas, para que haya polinización, fecundación y formación de grano (Airy *et al.*, 1987).

Entonces será necesario utilizar la mezcla de semilla de ambas versiones en proporciones adecuadas. Esta segunda opción es en la actualidad la estrategia adoptada en la mayoría de los materiales de México y de otros países por las empresas semilleras que usan la esterilidad masculina (Espinosa *et al.*, 2003).

El objetivo de esta investigación fue estudiar la capacidad productiva de cuatro híbridos trilineales de maíz con el carácter de androesterilidad, en la producción de semillas, así como determinar la mejor proporción de la mezcla de semilla androestéril y androfértil de los híbridos evaluados, de los cuales dos son del INIFAP y dos de la FESC-UNAM, en su versión fértil y androestéril, bajo diferentes densidades de población y diferentes proporciones de semilla, esto para la conformación del híbrido final, y establecer el porcentaje de la mezcla de semilla fértil y androestéril, para uso comercial. Como hipótesis se planteó que las proporciones de semilla androesteril más altas tendrán un mayor rendimiento que las proporciones de semilla fértil más altas.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano 2012 en dos localidades, la primera fue en la FESC-UNAM (Cuautitlán-UNAM), municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, a una altitud de 2274 m; y la segunda fue en el predio ubicado en Santa Lucía de Prías, del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), municipio de Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2240. En ambas localidades se sembraron dos experimentos en dos fechas de siembra. En Cuautitlán-UNAM la fecha de siembra uno, el 21 de mayo de 2012, y la fecha de siembra dos el 1 de junio de 2012; en el CEVAMEX-INIFAP la fecha de siembra uno, el 18 de mayo de 2012, y la fecha de siembra dos el 29 de mayo de 2012. Se manejaron dos densidades de población: 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, en cada localidad y las dos fechas de siembra.

Se utilizaron los híbridos trilineales Puma 1183 AEC1 y Puma 1183 AEC2 de la UNAM, H-53 (Espinosa *et al.* 2012a) y H-57 (Espinosa *et al.* 2012b) del INIFAP, todos en su versión androestéril y fértil. Cada uno de ellos en diferentes proporciones (mezcla) de semilla androestéril y fértil: 1) 100% semilla androestéril; 2) 66% semilla androestéril y 34% semilla fértil; 3) 34 % semilla androestéril y 66 % semilla fértil; 4) 100 % semilla fértil.

Las fechas de siembra dentro de cada localidad se manejaron como ambientes, empleándose cuatro ambientes (Cuautitlán Izcalli, fecha de siembra 1, y fecha de siembra 2; Santa Lucía de Prías, fecha de siembra 1, y fecha de siembra 2).

En todos los ambientes, a las plantas de las diferentes fechas de siembra se les dio un riego después de la siembra. Para el control de malezas se aplicó Gesaprim (Atrazina) 2kg/Ha y Hierbamina (2-4D amina) 2L/Ha. La cosecha se realizó el 10 y 17 de diciembre de 2012, Cuautitlán Izcalli y Santa Lucía, Texcoco, respectivamente.

La parcela experimental fue de un surco de 5 m de largo y 0.80 m entre surcos. El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones; el análisis estadístico se realizó como factorial, donde las fuentes de variación fueron: ambientes, proporciones de semilla androestéril y fértil, genotipos, densidades de población y las interacciones entre las fuentes de variación. Se utilizaron los datos de 21 variables, por lo que fue necesario realizar un análisis de correlación de Pearson para determinar qué variables definieron mejor el rendimiento. Después de lo anterior, las variables seleccionadas fueron: Rendimiento, altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. La comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad. Se usó el Programa SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002) para hacer todos los análisis.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado (Cuadro 2.1) detectó para rendimiento diferencias altamente significativas ambientes, genotipos, y densidades; la interacción Genotipo x Ambiente resultó altamente significativa, mientras que la interacción Genotipo x Densidad fue significativa. La media de rendimiento fue de 6282 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación de 18 %, lo cual indica que es aceptable dadas las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento.

CUADRO 2.1. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado para diversas variables de cuatro híbridos de maíz evaluados en dos densidades de población y cuatro ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2012.

FV	VARIABLES						
	G L	REND. (kg ha ⁻¹)	AP (cm)	AM (cm)	LM (cm)	GH	GM
Ambientes (A)	3	17074478.6**	9571.3**	16496.9**	20.1**	96.5**	41119.2**
Bloque /Amb) (B)	8	6113437.7**	635.3*	301**	3.8**	15.1**	3316.9
Genotipo (G)	3	69920409.3**	10388.9**	4619.9**	5.3**	58.6**	1061.2
Densidad (D)	1	23596325.2**	446.3	587.6*	0.1	1.6	6783.8
Proporción (P)	3	3255702.3	497.9	327.2*	0.7	11.5	4671.1
A x D	3	951219.1	95.3	192.1	1.4	6.9	2573.5
A x P	9	1380333.7	171.8	103.8	1.2	4.1	3217.8
A x G	9	4543142.2**	134.6	766.3**	5.5**	13.4**	2467.9
D x P	3	992023.4	89.7	209.1	0.46	6.1	3336.4
G x D	3	3822406*	343.9	289.6	1.2	6.3	6123.6*
G x P	9	1533966	268	419.4**	0.6	2.8	3297.7
A x D x P	9	714359.5	99.4	100.6	0.6	5.9	1562.5
A x G x D	9	985828.5	105.3	108.6	1.6	4.8	2410.3
A x G X P	27	1005897.4	198.8	75.7	1.3	3.3	1246.1
G x D x P	9	1520664.2	171.5	267*	0.9	3.1	1758.8
A x G x D x P	27	629532.3	174.2	117.6	1.6	7.2	2303.8
C.V.		18.0	5.9	8.9	7.03	7.2	10.6
Media		6286	250.4	120.7	15.2	31	451.2

FV: Fuente de variación; G L: Grados de libertad; REND.: Rendimiento; AP: Altura de planta; AM: Altura de mazorca; LM: Longitud de Mazorca; GH: Granos por hilera; GM: Granos por mazorca; kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea; cm: centímetros. Significancia estadística al 0.01 de probabilidad (**), al 0.05 de probabilidad (*); CV: Coeficiente de variación (%).

Para altura de planta hubo diferencias altamente significativas para Ambientes y genotipos. Para altura de mazorca hubo diferencias altamente significativas entre ambientes y entre genotipos; las interacciones Genotipo x Ambiente y Genotipo x Proporción de semilla fueron altamente significativas, mientras que se detectó significancia para densidades, proporciones de semilla, y en la interacción Genotipo x Densidad x Proporción hubo significancia. Para longitud de mazorca y granos por hilera hubo diferencias altamente significativas para ambientes y genotipos, mientras que la interacción Genotipo x Ambiente fue altamente significativa. Por último, para granos por mazorca hubo diferencias altamente significativas para Ambientes, y significancia para la interacción Genotipos x Densidades. Los resultados anteriores indican que todos los genotipos fueron diferentes entre sí, tanto fenotípicamente como por su composición genética.

Con respecto al comportamiento de los cuatro híbridos trilineales de maíz (Cuadro 2.2), se identificaron tres grupos de significancia para la variable rendimiento, siendo el H-53 el híbrido superior, en un segundo grupo de significancia se ubicaron el H-57 y el Puma 1183 AEC2; finalmente, en el tercer grupo de significancia se ubicó el Puma 1183 AEC1. El rendimiento del híbrido H-53 fue 16.4%, 17.9%, y 27.7% superior al de los híbridos H-57, Puma 1183 AEC2 y Puma 1183 AEC1, respectivamente. El comportamiento superior del híbrido H-53 confirma su alta capacidad productiva y buenos resultados observados en otros trabajos experimentales (Espinosa *et al.*, 2012a). El caso del rendimiento similar entre los híbridos Puma 1183 AEC2 y Puma 1183 AEC1, podría deberse a que en ambos maíces el progenitor macho que participa en su formación es el mismo (Tadeo, 2014, Comunicación personal).

Para altura de planta, los híbridos de mayor altura fueron el H-53 y H-57, mientras que el de menor altura fue el híbrido Puma 1183 AEC1. Para altura de mazorca, el híbrido con mayor valor fue el híbrido H-53. Por otro lado, para longitud de mazorca y granos por hilera se

obtuvieron dos grupos de significancia. El híbrido con mayor longitud de mazorca y con más granos por hilera fue el H-53, siendo también el híbrido más rendidor por tener más granos por hilera, y a su vez tuvo más granos por mazorca que los demás híbridos, los cuales son caracteres componentes del rendimiento importantes.

CUADRO 2.2. Comportamiento medio de cuatro híbridos de maíz considerando el promedio de las versiones Fértiles y Androestériles, en cuatro ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Ciclo Primavera – Verano 2012.

Genotipo	REND. (kg ha^{-1})	AP (cm)	AM (cm)	LM (cm)	GH	GM
H-53	7438.4 a*	257.4 a	130.1 a	15.5 a	31.6 a	454 a
H-57	6216.6 b	259.6 a	119.5 b	14.9 b	29.8 b	454 a
PUMA 1183 AEC2	6107.1 b	247.9 b	119.6 b	15.3 ab	31.3 a	446 a
PUMA 1183 AEC1	5380.4 c	236.8 c	113.5 c	15.3 ab	31 a	452 a
D.M.S.H. (0.05)	419.9	5.6	4	0.4	0.8	18

*Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

REND.: Rendimiento; AP: Altura de planta; AM: Altura de mazorca; LM: Longitud de Mazorca; GH: Granos por hilera; GM: Granos por mazorca; kg ha^{-1} : kilogramos por hectárea; cm: centímetros. Significancia estadística al 0.01 de probabilidad (**), al 0.05 de probabilidad (*); CV: Coeficiente de variación (%).

Para ambientes, se puede indicar que las variaciones existentes entre ellos pudieron atribuirse a las diferentes condiciones de suelo, clima y manejo agronómico (Cuadro 2.1).

El comportamiento de los cuatro ambientes evaluados (Cuadro 2.3), indica que para rendimiento se formaron dos grupos de significancia. El ambiente que correspondió a la segunda fecha de siembra en Cuautitlán se produjo el mayor rendimiento, y su promedio fue diferente al de los ambientes de la segunda fecha de siembra en Santa Lucía, así como del ambiente de la

primera fecha de siembra en Cuautitlán, y de la primera fecha de siembra en Santa Lucía. El mejor rendimiento en el ambiente de Cuautitlán en la segunda fecha de siembra, pudo deberse a que este experimento, en particular por la fecha de siembra, fue favorecido de mejor manera por precipitaciones oportunas y escape a un periodo seco en las primeras etapas del cultivo, a diferencia de la primera siembra, cuyos experimentos se sembraron con punta de riego.

Para altura de planta, en el caso del ambiente que correspondió a la segunda fecha de siembra en Cuautitlán, este presentó la menor altura de planta; sin embargo, en este ambiente se presentaron los mayores valores de longitud de mazorca y número de granos por mazorca, cuyos valores fueron diferentes significativamente con respecto a los otros ambientes, lo que pudo contribuir a la mejor expresión de rendimiento en el ambiente señalado (Cuadro 2.3).

Por otro lado, la diferencia entre las densidades de población señala que existió una relación entre la distinta cantidad de plantas establecidas, lo cual afectó el rendimiento de manera positiva o negativa y generó una competencia entre las plantas por nutrientes y luz (Cuadro 2.1).

CUADRO 2.3. Comportamiento medio de los ambientes evaluados para rendimiento (kg ha^{-1}), altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Cuautitlán-UNAM y Santa Lucía-INIFAP, ciclo Primavera – Verano 2012.

Ambiente	REND. (kg ha^{-1})	AP (cm)	AM (cm)	LM (cm)	GH	GM
Cuautitlán F2.	6877 a*	236 b	120 b	15.9 a	30.9 b	467 a
Santa Lucía F2.	6293 b	257 a	111 c	15 b	32.2 a	468 a
Cuautitlán F1.	6033 b	253 a	139 a	15.2 b	30.6 bc	445 b
Santa Lucía F1.	5940 b	257 a	112 c	14.8 b	29.8 c	425 c
D.M.S.H. (0.05)	420	6	4	0.4	0.8	18

*Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

F1 y F2: Fechas de siembra; REND.: Rendimiento; A. P.: Altura de planta; A. M.: Altura de mazorca; L. M.: Longitud de Mazorca; G. H.: Granos por hilera; G. M.: Granos por mazorca; kg ha⁻¹: Kilogramos por hectárea; cm: centímetros.

El comportamiento de las dos densidades de población (Cuadro 2.4) indica que la densidad de población con 70 000 plantas por hectárea tuvo el mayor rendimiento, y fue estadísticamente diferente a la densidad de población de 50 000 plantas por hectárea. El rendimiento fue mayor en la densidad de 70 000 plantas por hectárea por haber más individuos por unidad de área, comportamiento similar al que se obtuvo en otros trabajos (Espinosa *et al.*, 2004; Virgen-Vargas *et al.*, 2010), donde señalan que el rendimiento de grano se incrementó al aumentar la densidad de población.

La altura de mazorca fue mayor en la densidad de 70 000 plantas por hectárea, comparada con la de 50 000 plantas por hectárea; en el resto de las variables no se encontraron diferencias significativas entre los dos niveles de densidad de población (Cuadro 2.4), evidenciando con ello, que no fueron afectadas por el incremento en el número de plantas por hectárea; lo anterior podría deberse a la propia naturaleza de los genotipos utilizados en el estudio (Espinosa *et al.*, 2012c), los cuales tienen buena respuesta al incremento en la densidad de población.

CUADRO 2.4. Comportamiento medio para dos densidades de población considerando la media de cuatro híbridos evaluados en versiones fértiles y androestériles, para rendimiento (kg ha⁻¹), floración masculina y femenina, altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Ciclo Primavera – Verano 2012.

Densidades	REND. (kg ha ⁻¹)	AP (cm)	AM (cm)	LM (cm)	GH	GM
70 000 plantas/ha	6534 a*	251 a	122 a	15.2 a	31 a	447 a
50 000 plantas/ ha	6038 b	249 a	119 b	15.2 a	31 a	455 a
D.M.S.H. (0.05)	226	3	2.2	0.2	0.45	10

*Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

REND.: Rendimiento; A. P.: Altura de planta; A. M.: Altura de mazorca; L. M.: Longitud de Mazorca; G. H.: Granos por hilera; G. M.: Granos por mazorca; kg ha⁻¹: Kilogramos por hectárea; cm: centímetros.

En el factor proporciones de semilla no hubo diferencias estadísticas en el análisis de varianza combinado (Cuadro 2.1), lo que indica que éstas tuvieron un comportamiento similar.

El comportamiento de las diferentes proporciones de semilla androestéril y fértil presentaron dos grupos de significancia (Cuadro 2.5). En el primero de ellos, que fue el de mayor rendimiento, se ubicaron los tratamientos con proporción y combinación de semilla androestéril y fértil siguiente: la proporción de semilla 100% androestéril y 0% fértil tuvo el rendimiento de grano más elevado, lo que no sería viable por cuestión práctica en producciones comerciales de semilla, ya que es necesario que haya un macho polinizador común para que polinice y ocurra la fecundación en las plantas, para que posteriormente haya formación de grano y rendimiento; por otra parte, la combinación de semilla con las proporciones de 33% androestéril y 64% fértil, y la proporción con 66% androestéril y 34% fértil, tuvieron comportamientos similares y no presentaron diferencia significativa con respecto a la primera proporción (100% androestéril 0% fértil). Lo anterior representó el 2.9% y 1.4% más de rendimiento en las proporciones con 33% y 66% de semilla androestéril/fértil, respectivamente, comparado con la proporción de semilla con 0% androestéril y 100% fértil. Esto indica que al utilizar la androesterilidad en diferentes proporciones ayuda a incrementar el rendimiento y a mantener la calidad genética del híbrido, como se señala en trabajos previos (Feil B. *et al.*, 2003; Weingartner *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2005; Espinosa *et al.*, 2009).

CUADRO 2.5. Comportamiento medio de cuatro proporciones de semilla Androestéril y Fértil considerando la media de cuatro híbridos evaluados en dos densidades de población y cuatro ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), floración masculina y femenina, altura de planta, altura de mazorca, longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca. Ciclo Primavera – Verano 2012.

Proporción semilla							
% AE	% F	REND. (kg ha^{-1})	AP (cm)	AM (cm)	LM (cm)	GH	GM
100	0	6540 a	249 a	123 a	15.3 a	31.3 a	459 a
33	67	6290 ab	251 a	120 ab	15.1 a	30.6 a	443 a
66	34	6200 ab	249 a	118 b	15.2 a	31 a	454 a
0	100	6113 b	254 a	121 ab	15.2 a	30.6 a	448 a
D.M.S.H. (0.05)		420	5.6	4	0.4	0.8	18

*Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

AE: Androestéril; F: Fértil; REND.: Rendimiento; A. P.: Altura de planta; A. M.: Altura de mazorca; L. M.: Longitud de Mazorca; G. H.: Granos por hilera; G. M.: Granos por mazorca; kg ha^{-1} : Kilogramos por hectárea; cm: centímetros.

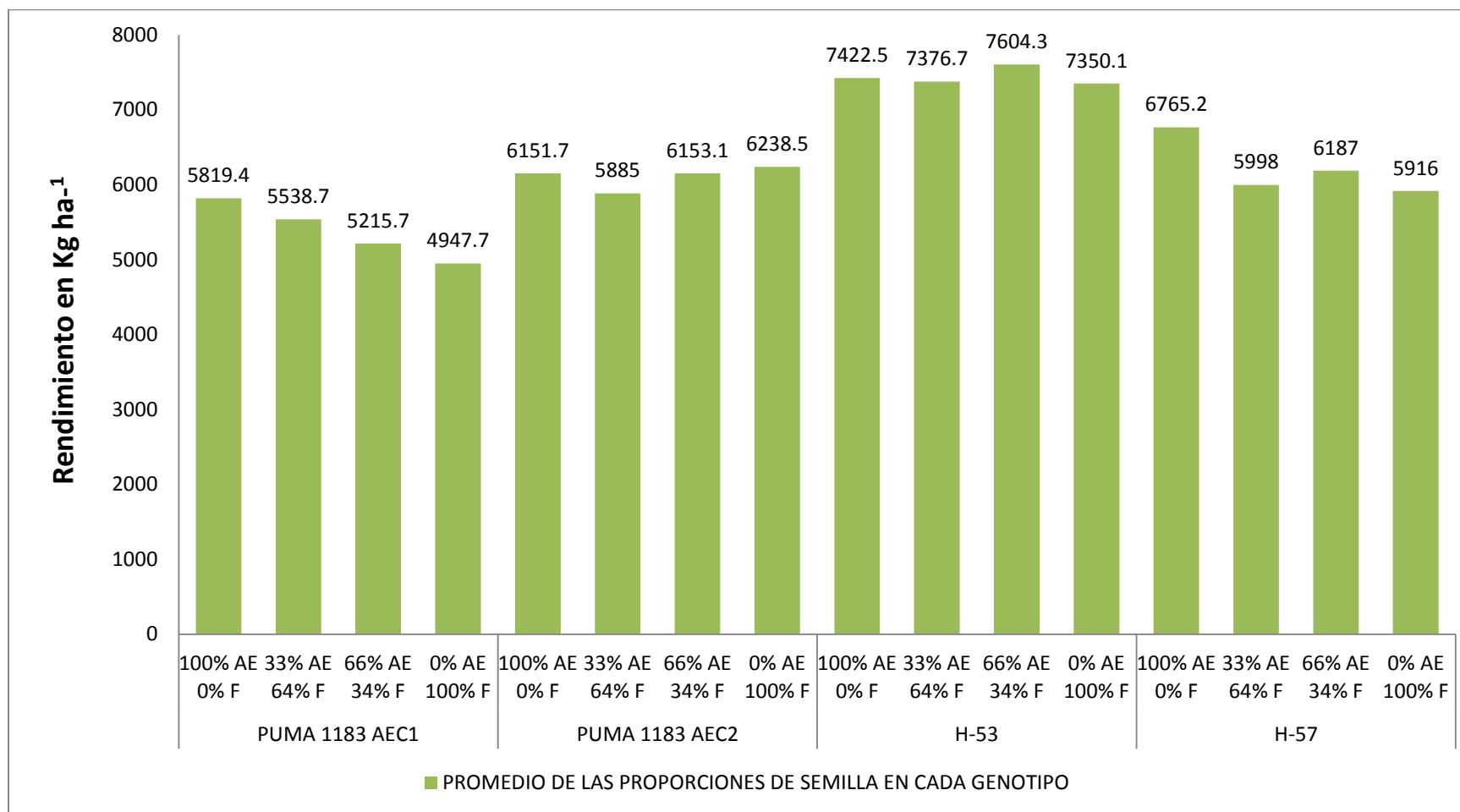
En la interacción Genotipo x Proporción de semilla, no hubo significancia para ésta en el análisis de varianza combinado para rendimiento (Cuadro 2.1) y esto se debió a que siempre hubo disposición de polen de plantas de unidades experimentales vecinas que polinizara y fecundara a las plantas de las unidades experimentales con proporciones de semilla androestéril, asegurando así que siempre hubiera rendimiento en todos los tratamientos.

Para la interacción Genotipo x Proporción, la proporción de semilla 100% Androestéril y 0% Fértil tuvo el rendimiento más alto en promedio en los genotipos Puma 1183 AEC1, Puma AEC2, y H-57, siendo éste también alto en el H-53 (Figura 2.1). En esta proporción de semilla, la polinización, la fecundación y la formación de grano se debieron al polen de plantas fértiles cercanas de otras unidades experimentales. Esto muestra la necesidad de hacer evaluaciones en

experimentos posteriores, aislando en tiempo y espacio los tratamientos con las proporciones de semilla androestéril y fértil diferentes, para evaluar la eficiencia de la polinización y fecundación de la proporción de semilla fértil, posibles efectos de heterosis o xenia.

El híbrido trilineal H-53 expresó el rendimiento promedio más alto en las cuatro proporciones de semilla, en comparación con los otros genotipos. Las proporciones de semilla 33% Androestéril 67% Fértil y 66% Androestéril 34% Fértil, en todos los genotipos, presentaron rendimientos favorables, bajo las condiciones en las que se manejó el experimento, y son proporciones de semilla recomendables en plantaciones comerciales de semilla.

FIGURA 2.1. Comportamiento medio del rendimiento (kg ha^{-1}) de las cuatro proporciones de semilla evaluadas en los cuatro genotipos, bajo dos densidades de población probadas en cuatro ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2012.

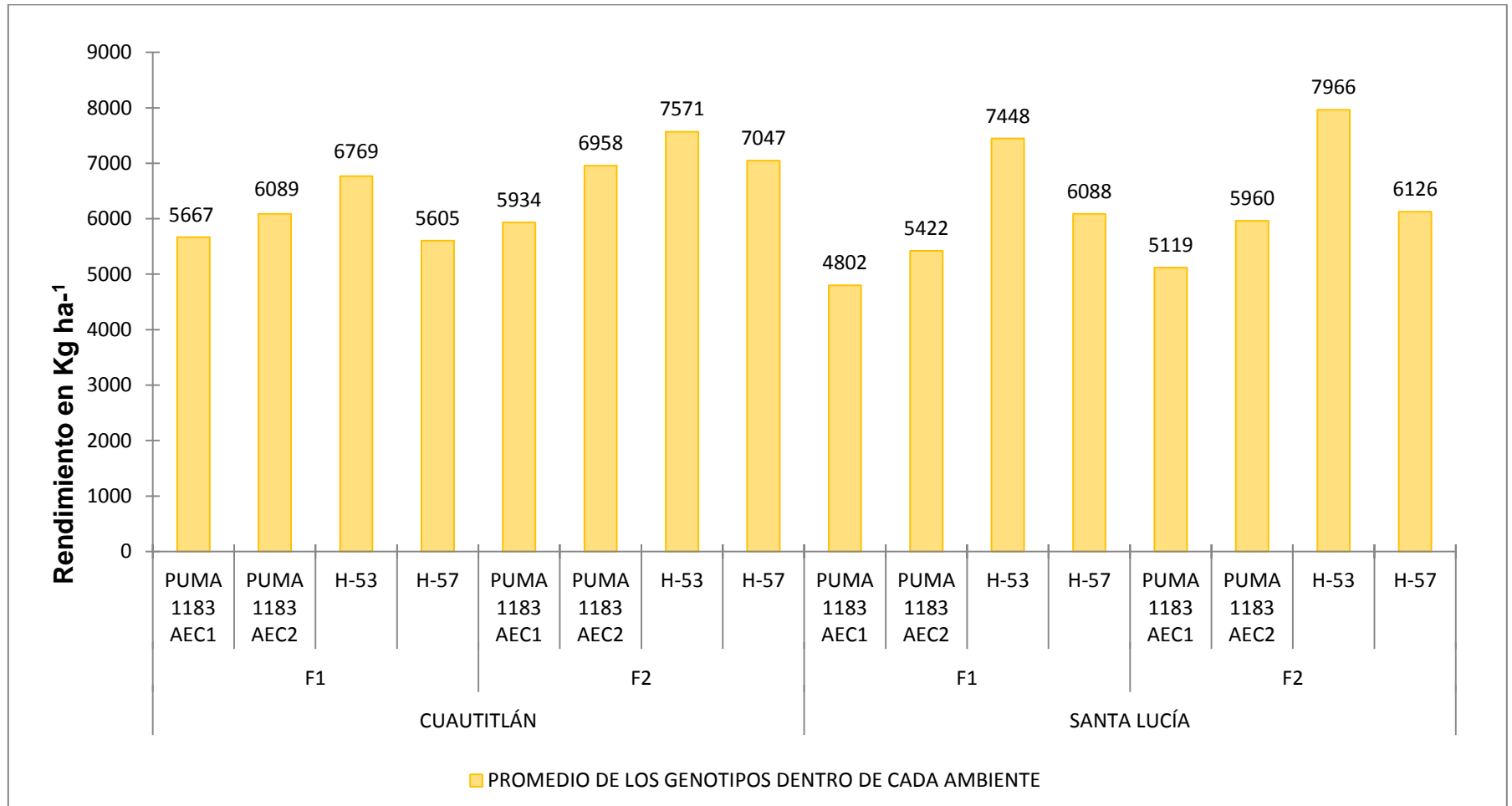


AE: Androesteril; F: Fértil; kg ha^{-1} : kilogramos por hectárea.

En la interacción Genotipo x Ambiente, en el rendimiento hubo diferencias estadísticas altamente significativas, esto indica que los genotipos se comportaron de manera diferencial a través de los ambientes (Cuadro 2.1), y que además las variables evaluadas fueron muy influenciadas por el ambiente, por lo que se consideran de herencia cuantitativa.

El rendimiento de los cuatro genotipos en los cuatro ambientes se comportó como sigue: hubo mayor variación en los ambientes de Santa Lucía, Texcoco, en las dos fechas de siembra, comparado con los ambientes de Cuautitlán Izcalli en ambas fechas de siembra, pues se formaron tres y dos grupos de significancia respectivamente (Figura 2.2). El mayor rendimiento lo tuvo el híbrido H-53 en todos los ambientes, siendo éste a su vez estadísticamente diferente a los demás genotipos. En la segunda fecha de siembra de los ambientes de Cuautitlán Izcalli y Santa Lucía, Texcoco, los rendimientos expresaron mayor potencial productivo que en los ambientes de la primera fecha de siembra, en ambas localidades. Los ambientes de Cuautitlán Izcalli siempre mostraron mayores rendimientos que los ambientes de Santa Lucía, Texcoco. Estos resultados indican que el rendimiento pudo verse influenciado por algún factor climático en cada ambiente, como la precipitación, temperatura o por las características del suelo, considerando que las propiedades del suelo de Cuautitlán Izcalli son de textura arcillosa, por lo que tienen mayor capacidad de retención del agua que precipita, y además el contenido de materia orgánica es mayor que en los suelos de Santa Lucía, Texcoco, los cuales son más arenosos y su capacidad de retención del agua es menor.

Figura 2.2. Comportamiento medio del rendimiento (kg ha^{-1}) de cuatro híbridos evaluados en cuatro ambientes, bajo dos densidades de población y versiones fértiles y androestériles. Ciclo Primavera – Verano 2012.



F1: Fecha de siembra 1; F2: Fecha de siembra 2; kg ha^{-1} : Kilogramos por hectárea.

2.6 CONCLUSIONES

El híbrido trilineal de maíz H-53 tuvo el rendimiento más alto (7438 kg ha⁻¹) de los genotipos evaluados en los cuatro ambientes de prueba.

El ambiente de Cuautitlán en la segunda fecha de siembra, tuvo el rendimiento más alto (6877 kg ha⁻¹), considerando la media de los cuatro genotipos.

La densidad de población de 70 000 plantas por hectárea, tuvo el mayor rendimiento con respecto a 50 000 plantas por hectárea.

La proporción de semilla, mezclando 100% semilla androestéril y 0% semilla fértil tuvo el mayor rendimiento (6 540 kg ha⁻¹), similar estadísticamente a las proporciones de semilla con 33% androestéril y 67% fértil (6290 kg ha⁻¹), 66% androestéril y 34% fértil (6200 kg ha⁻¹), aunque la primera no es opción económica ni viable prácticamente.

Las proporciones de 100%, 33% y 66% de semilla androestéril, tuvieron rendimientos mayores en 6.9%, 2.4%, y 1.4%, con respecto a la proporción 100% fértil, indicando que el uso de la androestrilidad en las diferentes proporciones de semilla propició incrementos en el rendimiento, en comparación con la versión completamente fértil.

2.7 LITERATURA CITADA

- Airy J. M., Tatum L. A., Sorenson J. W., 1987. La producción de Semillas. Producción de Semilla Híbrida de Maíz y Sorgo para Grano. Ed. C. E. C. S. A. México. p. 274-285.
- Allen J. O., Fauron C. M., Minx P., Roark L., Oddiraju S., Lin G. N., Meyer L., Sun H., Kim K., Wang C., Du F., Xu D., Gibson M., Cifrese J., Clifton S. W., Newton K. J. 2007. Comparisons Among Two Fertile and Three Male-Sterile Mitochondrial Genomes of Maize. *Genetics* 177: 1173-1192.
- Espinosa C. A., Tadeo R. M., Lothrop J., Azpiroz R. S., Martínez M. R., Pérez C. J. P., Tut C. C., Bonilla B. J., Ramírez A. M., Salinas M. Y. 2003. H-48, nuevo híbrido de maíz de temporal para los Valles Altos del Centro de México. *Agricultura Técnica en México*. Vol. 29. Núm.1: 85-87.
- Espinosa C. A., Tadeo R. M., Sierra M. M., Turrent F. A., Valdivia B. R., Zamudio G. B. 2009. Rendimiento de híbridos de maíz bajo diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en México. *Agronomía Mesoamericana* 20(2): 211-216.
- Espinosa Calderón A., Tadeo Robledo M., Gómez Montiel N., Virgen Vargas J., Sierra Macías M., Palafox Caballero A., Zamudio González B., Arteaga Escamilla I., Canales Islas E. I., Martínez Yáñez B., Vázquez Carrillo G., Valdivia Bernal R. 2012a. H-53 AE1: Híbrido de maíz para Valles Altos y Zona de Transición con esterilidad masculina para producción de semilla. *Memoria Técnica no. 13. Campo Experimental Valle de México*. Vol.13, pág.38-40. *Memorias de congresos*.
- Espinosa Calderón A., Tadeo Robledo M., Gómez Montiel N., Virgen Vargas J., Sierra Macías M., Palafox Caballero A., Zamudio González B., Arteaga Escamilla I., Canales Islas E. I., Martínez Yáñez B., Vázquez Carrillo G., Valdivia Bernal R. 2012b. H-57 AE: Híbrido de maíz para valles altos con esterilidad masculina para producción de semilla. *Memoria*

Técnica no. 13. Campo Experimental Valle de México. Vol.13, pág.41-44. Memorias de congresos.

Espinosa Calderón A., Tadeo Robledo M., Zamudio González B., Turrent Fernández A., Arteaga Escamilla I., Trejo Pastor V., Martínez Yáñez B., Canales Islas E., Zaragoza Esparza J., Sierra Macías M., Gómez Montiel N., Valdivia Bernal R., Palafox Caballero A. 2012c. Rendimiento de cruza simples de maíz en versión androestéril y fértil bajo diferentes densidades de población. *Ciencias Agrícolas Informa*. 21(2). 78-85.

Espinosa T. E., Mendoza C. M. del C., Ortiz C. J. 2004. Rendimiento de grano y sus componentes en poblaciones prolíficas de maíz, en densidades de siembra. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 27. (Número Especial 1): 39-41.

Feil B., Weingartner U., Stamp P. 2003. Controlling the release of pollen from genetically modified maize and increasing its grain yield by growing mixtures of male-sterile and male-fertile plants. *Euphytica* 130: 163-165.

Jugenheimer R. W., 1990. Maíz, variedades mejoradas, métodos de cultivo y producción de semillas. Limusa. México. p. 489-502.

Martínez-Lázaro C., Mendoza-Onofre L. E., García-de L. S. Gabino., Mendoza-Castillo M. del C., Martínez-Garza A. 2005. Producción de semilla híbrida de maíz con líneas androfértiles y androestériles isogénicas y su respuesta a la fertilización y densidad de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 28 (2): 127-133.

Simmons C. R., Grant S., Altier D. J., Dowd P. F., Crasta O., Folkerts O., Yalpani N. 2001. Maize *rhm 1* Resistance to *Bipolaris maydis* is Associated with few differences in pathogenesis-related proteins and global mRNA profiles. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 14 (8): 947-954.

- Tadeo R. M., Espinosa C. A., Serrano R. J., Sierra M. M., Caballero H. F., Valdivia B. R., Gómez M. N. O., Palafox C. A., Rodríguez M. F. A., Zamudio G. B. 2010. Productividad de diferentes proporciones de semilla androestéril y fértil de híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(3): 273-287.
- Tadeo R. M., Espinosa C. A., Solano A. M., Martínez M. R. 2003. Androesterilidad en líneas e híbridos de maíz de Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 14(1): 15-19.
- Virgen-Vargas J., Arellano-Vázquez J. L., Rojas-Martínez I., Ávila-Perches M. A., Gutiérrez-Hernández G. F. 2010. Producción de semilla de cruces simples de híbridos de maíz en Tlaxcala, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 107-110.
- Weider C., Stamp P., Christov N., Hüskén A., Foueillasar X., Camp K., Munsch M. 2009. Sterility in maize under different environmental conditions. *Crop Science* 49: 77-84.
- Weingartner U., Camp K., Stamp P. 2004. Impact of male sterility and xenia on grain quality traits of maize. *European Journal of Agronomy* 21: 239-247.

III. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE GRANO EN HÍBRIDOS TRILINEALES Y CRUZAS SIMPLES DE MAÍZ PARA LOS VALLES ALTOS DE MÉXICO

3.1 RESUMEN

En la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-CEVAMEX), se cuenta con híbridos trilineales y sus cruzas simples progenitoras de maíz, a cuyos progenitores se les incorporó la androesterilidad, como una alternativa, para facilitar la producción de semillas, favorecer el mantenimiento de la calidad genética, y para disminuir costos de producción de semilla. Previo a la liberación comercial de estos híbridos de maíz para su uso extensivo y abastecimiento de semilla en los Valles Altos de México (2200 a 2600 msnm), se consideró necesario identificar los mejores genotipos, tomando como criterios su rendimiento y estabilidad que éstos presenten en los diferentes ambientes de prueba. El objetivo de este trabajo fue identificar a los híbridos trilineales y cruzas simples de maíz que presenten estabilidad del rendimiento de grano, utilizando los Parámetros de Estabilidad de Eberhart y Russell, y el modelo AMMI, así como definir el modelo que mejor describa la interacción genotipo por ambiente. Se evaluaron cuatro híbridos trilineales y cinco cruzas simples progenitoras de los híbridos trilineales. Los experimentos se establecieron en condiciones de punta de riego en dos localidades y en cada una dos fechas de siembra y dos densidades de población, de esta manera se conformaron los diferentes ambientes de prueba, combinando localidades x fechas de siembra x densidades de población. El modelo AMMI identificó como estables a los híbridos trilineales H-57, Puma 1183 AEC2, y las cruzas simples H-57 AE y H-57 F, mientras que en los parámetros de estabilidad, los híbridos trilineales H-53, Puma 1183 AEC1 y Puma 1183 AEC2, y las cruzas simples H-57 AE, Puma 1183 AEC1 AE y Puma 1183 AEC1 F se consideraron como estables por sus

coeficientes de regresión cercanos a la unidad y desviaciones de regresión próximas a cero. Los niveles de correspondencia entre ambos modelos, para los híbridos trilineales y las cruza simples fueron del 50% y 20%, respectivamente. Se concluye que ambos modelos identificaron por lo menos a un híbrido trilineal y a una cruza simple como estables, pero fue el modelo AMMI el que mejor describió la interacción genotipo por ambiente.

PALABRAS CLAVE: *Zea mays* L., productividad, rendimiento, estabilidad, adaptabilidad, híbridos trilineales, cruza simples, producción de semillas.

3.2 SUMMARY

The Faculty of Superior Studies Cuautitlan (FESC-UNAM) and the National Institute for Forestry, Agricultural and Animal Research (CEVAMEX-INIFAP) have developed maize three-way and single crosses in which their parents have been converted to the male sterility system as an alternative to facilitate seed production and favored the maintenance of the genetic quality and reduce the cost of seed production. Prior to the commercial release of these maize hybrids for their extensive use and supply of seed of these in the High Valleys of Mexico (2200-2600 masl), it was considered necessary to define the best genotypes with good performance and stability in different test environments. So the objective of this study was to identify the three-way hybrids and single crosses maize hybrids with stability of grain yield, using the parameters of Stability of Eberhart and Russell and the AMMI model, and to define the model that best describes the genotype by environment interaction. Four three-way hybrids and five parental were evaluated single crosses. Experiments were planted under irrigation conditions in two locations. In each site, two planting dates and two densities were planted. In this way, different test environments were formed, combining locations x planting dates x population densities. The AMMI model

identified as stables the three-way hybrids H-57, 1183 Puma AEC2, and the single crosses H-57 AE and H-57 F; for the parameters of stability, the three-way hybrids H-53, Puma 1183 1183 AEC1 and Puma AEC2, and the single crosses H-57 AE, Puma 1183 AEC1 MS and Puma 1183 AEC1 F were considered as the most stables by their regression coefficients close to the unity and deviation of regression close to zero. The level of correspondence between the two models, for the three-way hybrids and the single crosses was 50% and 20%, respectively. With the conclusion, that both models identified at least one three-way hybrid and one single cross as stables. The AMMI model was better to describe the genotype by environment interaction.

Key words: *Zea mays* L., productivity, performance, stability, adaptability, three-way hybrids, single crosses, seed production.

3.3 INTRODUCCIÓN

El uso de híbridos trilineales de maíz (*Zea mays* L.) en México incluyendo los Valles Altos (2200 a 2600 m de altitud), es generalizado en la actualidad, su inicio data de 1986, cuando se identificaron ventajas a este tipo de híbridos: facilitan la producción de semillas, se requieren menor número de lotes de progenitores para llegar a la semilla certificada, el control de la calidad genética es accesible al poderse desmezclar fácilmente la línea progenitora macho, el híbrido trilineal posee buena heterosis con respecto a cruza simples y cruza dobles. En el pasado, de 1943 a 1985, los híbridos de crusa doble, de progenitores de baja endogamia, fue el tipo de conformación de híbridos más utilizado en México, con base en un objetivo relacionado con la intención de que tuviesen mayor adaptabilidad, sin embargo, en general mostraban baja heterosis, dificultades para la producción de semilla, más esfuerzo, y mayores costos de producción para la obtención del híbrido final (Espinosa *et al.*, 1986).

Los híbridos de cruce simple que se han generado para esta zona de producción, no han tenido el potencial productivo esperado, pero tampoco se cuenta con líneas hembra homocigóticas altamente rendidoras; además, estos híbridos presentan alta interacción genotipo x ambiente (GE). Pero en contraparte éstas cruces simples han sido la llave para la obtención de híbridos trilineales, ya que la cruce simple que participa como hembra es de alta productividad (Espinosa *et al.*, 1998; Sierra *et al.*, 2006; Márquez, 2009).

En programas de mejoramiento genético, es importante definir cuáles son los genotipos sobresalientes en cuanto a rendimiento, adaptación y estabilidad, evaluando estas propiedades en multi-ambientes para recomendar su uso de manera comercial (Crossa *et al.*, 2006). La adaptación se puede describir tanto en sentido amplio, como en sentido específico. La adaptación en sentido amplio, se refiere al mejor comportamiento relativo de un genotipo en la mayoría de los ambientes de prueba, mientras que, la adaptación en sentido específico, la muestra el genotipo con mejor comportamiento relativo en un determinado ambiente de prueba (Cooper *et al.*, 1999 y Fuentes *et al.*, 2005). Al respecto, Hanson (citado por Márquez, 1973), define al genotipo estable, como aquel que tiene la variabilidad mínima posible, cuando se desarrolla en diferentes ambientes.

El estudio de la interacción genotipo x ambiente (GE) en el mejoramiento genético vegetal es muy importante, pues esta es el resultado de la respuesta de cada genotipo frente a las variaciones ambientales (Crossa *et al.*, 1990). Cuando ésta es alta, se dificulta el proceso de selección y recomendación de genotipos sobresalientes y estables.

Para lograr mejores avances en el mejoramiento genético de una especie, es necesario establecer correctamente las metodologías a utilizar para la evaluación de la interacción genotipo x ambiente (GE), para conocer la respuesta diferencial de los genotipos a través de los ambientes

de prueba y determinar en qué medida se verá afectado el proceso de selección a causa de la interacción genotipo x ambiente.

En la actualidad se cuenta con diversas metodologías para el estudio de la estabilidad en diversos cultivos, entre los métodos univariados, donde destaca el modelo de Eberhart y Russell (1996), quienes efectuaron una modificación del método de Finlay y Wilkinson (1963), utilizando la media aritmética de los datos reales y señalando que el coeficiente de la regresión podía ser utilizado como estimador para medir la respuesta de cada cultivar a los índices ambientales, y la estabilidad de producción se podría medir por la magnitud de la desviación a partir de la regresión lineal, es decir, por el cuadrado medio de la desviación de regresión. En este modelo una variedad con media alta, coeficiente de regresión $\beta_i = 1$ y desviación no significativamente diferente de cero ($\delta_{di}^2 = 0$) se considera la variedad ideal estable.

Por otra parte, métodos multivariados como lo es El AMMI (modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa), que consiste esencialmente en combinar las técnicas del análisis de varianza y el análisis de componentes principales (ACP) en un sólo modelo. En estos, el análisis de varianza permite estudiar los efectos principales de genotipos y ambientes, en tanto que, la interacción genotipo x ambiente (IGA) es tratada de forma multivariada mediante el ACP, donde se realiza una reparametrización del modelo de regresión para mejorar la interpretación de la interacción (Zobel, 1988; Gauch, 1992).

La herramienta básica para interpretar los resultados obtenidos del análisis AMMI, de acuerdo con Yan *et al.* (2000), es utilizar los efectos combinados de genotipos (G) y de interacción genotipo por ambiente (IGE) en la evaluación del rendimiento, obteniéndose los gráficos denominados GGE (genotipo G + interacción genotipo x ambiente GE) biplot, que facilitan la identificación visual de los genotipos y los ambientes de evaluación. Generalmente,

los gráficos GGE biplot se confeccionan utilizando los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2). Así, el genotipo que está en el vértice es el que responde mejor en esos ambientes (Yan *et al.*, 2001).

Partiendo de lo mencionado líneas arriba, el objetivo de este trabajo fue identificar a los híbridos trilineales y cruza simples de maíz que presenten mejor estabilidad del rendimiento de grano, utilizando dos modelos para evaluar la estabilidad (Parámetros de Estabilidad de Eberhart y Russell, y AMMI), así como definir al modelo que mejor describa la interacción genotipo por ambiente. En base a los resultados obtenidos, se pretende, además, poder hacer una recomendación para apoyar la posterior liberación comercial en el caso de los mejores híbridos trilineales.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Éste trabajo se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano 2012, en dos localidades, la primera fue la FESC-UNAM (Cuautitlán-UNAM), municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, a una altitud de 2274 m; la segunda localidad fue en el predio Santa Lucía de Prías, de el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), municipio de Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2240. En ambas localidades se sembraron dos experimentos en dos fechas de siembra. En Cuautitlán-UNAM la fecha de siembra uno fue el 21 de mayo de 2012; y la fecha de siembra dos el 1 de junio de 2012; en el CEVAMEX-INIFAP la fecha de siembra uno fue el 18 de mayo de 2012; y fecha de siembra dos el 29 de mayo de 2012.

Para los híbridos trilineales se manejaron dos densidades de población: 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, mientras que para las cruza simples se manejaron cuatro densidades de población: 40 000, 55 000, 70 000 y 80 000 plantas por hectárea.

Se utilizaron los híbridos trilineales Puma 1183 AEC1 y Puma 1183 AEC2 de la UNAM, H-53 (Espinosa *et al.*, 2012a) y H-57 (Espinosa *et al.*, 2012b) del INIFAP, todos en su versión androestéril (AE) y fértil (F).

En el caso de las cruzas simples, se utilizaron cinco cruzas simples (CS): CS Puma 1183 AEC1 Androestéril (AE), CS Puma 1183 AEC1 Fértil (F), CS Puma 1183 AEC2 Fértil (F), CS H-53 Androestéril (AE) y CS H-53 Fértil (F).

En los híbridos trilineales las dos fechas de siembra, en las dos localidades y las dos densidades de siembra (70 000 y 50 000 plantas por hectárea) se individualizaron para conformar los ambientes, generando ocho ambientes (dos localidades x dos fechas de siembra x dos densidades de población), los ambientes generados están compuestos de las siguientes combinaciones:

Cuadro 3.1. Descripción de los diferentes ambientes de prueba para los híbridos trilineales.

Ambiente	Localidad	Fecha de siembra	Densidad de población
A1	Cuautitlán	1	50 000
A2	Cuautitlán	1	70 000
A3	Cuautitlán	2	50 000
A4	Cuautitlán	2	70 000
A5	Santa Lucía	1	50 000
A6	Santa Lucía	1	70 000
A7	Santa Lucía	2	50 000
A8	Santa Lucía	2	70 000

Para las cruzas simples las dos fechas de siembra, dos localidades y cuatro densidades de siembra (40 000, 50 000, 70 000 y 80 000 plantas por hectárea) se individualizaron para

conformar los ambientes, generando dieciséis ambientes (dos localidades x dos fechas de siembra x cuatro densidades de población), cada ambiente consiste en las siguientes combinaciones:

Cuadro 3.2. Descripción de los diferentes ambientes de prueba para las cruzas simples.

Ambiente	Descripción del ambiente		
	Localidad	Fecha de siembra	Densidad de población
A1	Cuautitlán	1	40 000
A2	Cuautitlán	1	50 000
A3	Cuautitlán	1	70 000
A4	Cuautitlán	1	80 000
A5	Santa Lucía	1	40 000
A6	Santa Lucía	1	50 000
A7	Santa Lucía	1	70 000
A8	Santa Lucía	1	80 000
A9	Cuautitlán	2	40 000
A10	Cuautitlán	2	50 000
A11	Cuautitlán	2	70 000
A12	Cuautitlán	2	80 000
A13	Santa Lucía	2	40 000
A14	Santa Lucía	2	50 000
A15	Santa Lucía	2	70 000
A16	Santa Lucía	2	80 000

En todos los ambientes, a las diferentes fechas de siembra se les dio un riego después de la siembra. Para el control de malezas se aplicó Gesaprim (Atrazina) 2kg/ha, Hierbamina (2-4D amina) 2L/ha. La cosecha se realizó el 10 y 17 de diciembre de 2012, Cuautitlán Izcalli y Santa Lucía, Texcoco, respectivamente.

Para ambos experimentos la parcela experimental fue de un surco de 5 m de largo y 0.80 m entre surcos. El diseño experimental que se utilizó fue bloques completos al azar con tres repeticiones, en el análisis estadístico factorial. Los factores de variación para el caso de los híbridos trilineales fueron ambientes, genotipos y las interacciones entre los factores de variación; los factores de variación para el caso de las cruzas simples fueron ambientes, genotipos y la interacciones entre los factores de variación. La comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.

Para evaluar la interacción genotipo x ambiente se utilizaron los valores de rendimiento, trabajando por separado con los híbridos trilineales y cruza simples.

Modelo AMMI

Con este modelo se obtuvo el análisis de varianza para determinar los efectos de genotipos, ambientes y sus interacciones. Se consideraron los dos primeros componentes principales para la explicación de la interacción genotipo x ambiente. La representación gráfica fue obtenida por un Biplot, el cual mostró el patrón producido por la interacción genotipos x ambientes.

El modelo empleado fue **el de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI)** para modelar la respuesta de los ambientes, los genotipos y la IGA. Se emplearon las rutinas de programación AMMI descritas por Vargas y Crossa (2000) bajo el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + E_{ij}$$

Donde: Y_{ij} = rendimiento del i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente; μ = media general; g_i = efecto del i-ésimo genotipo; e_j = efecto del j-ésimo ambiente; λ_k = raíz cuadrada del vector característico del k-ésimo eje del ACP; α_{ik} = calificación del ACP para el k-ésimo eje del i-ésimo genotipo; γ_{jk} = calificación del ACP para el k-ésimo eje del j-ésimo ambiente; E_{ij} = valor del error.

Parámetros de estabilidad

Se usaron los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell (1966), para medir la interacción genotipo x ambiente, y se utilizó la clasificación de la adaptabilidad de las variedades propuesta por Carballo y Márquez (1970), donde b_i , es el coeficiente de regresión, y δ_{di}^2 es la desviación de regresión, que se basa en la definición de estabilidad propuesta por Eberhart y Russell (1966), la cual dice que una variedad estable es aquella que muestra un coeficiente de regresión igual a la unidad ($b_i=1$) y desviaciones de regresión iguales a cero ($\delta_{di}^2 = 0$), con una media de rendimiento alta. El modelo estadístico es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu_i + \beta_i I_j + \delta_{ij} \text{ donde:}$$

Y_{ij} = promedio del genotipo i en el ambiente j; μ_i = promedio del genotipo i en todos los ambientes; β_i = coeficiente de regresión que mide la respuesta del genotipo i al variar los ambientes; I_j = índice ambiental del ambiente j-ésimo que se calcula como la desviación del promedio de los genotipos en un ambiente dado a partir del promedio general; δ_{ij} = desviación de la regresión.

Los datos utilizados en ésta metodología, se analizaron aplicándoles un algoritmo computacional para obtener los indicadores de estabilidad de Mastache y Martínez (1996).

Los análisis se realizaron mediante el programa SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Híbridos trilineales

En el análisis de varianza combinado del AMMI (Cuadro 3.3), detectó diferencias altamente significativas para ambientes y para genotipos para rendimiento, mientras que en la interacción genotipo x ambiente no hubo significancia. Con un coeficiente de variación de 12.7 %, el cual es de valor aceptable, dadas las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento.

Para rendimiento la diferencia entre ambientes, indica que las condiciones ambientales fueron diferentes en todos los ambientes de prueba. La diferencia en rendimiento entre genotipos, es el resultado de la divergencia genética de los híbridos evaluados, es decir, que el origen genético es diferente. La ausencia de significancia de la interacción genotipo x ambiente (IGE) en rendimiento, que es un carácter de tipo cuantitativo, es altamente influenciada por las condiciones ambientales, observándose que no hubo una respuesta diferencial de los genotipos en los diferentes ambientes de prueba.

Con respecto a la suma de cuadrados total, el efecto de ambientes contribuyó en un 14.2%, la interacción genotipos x ambientes 11.2%, y el 42.4% corresponde al efecto de genotipos del total. Lo que indica que los genotipos, en su conformación, contribuyen en mayor proporción a la variación en el rendimiento en comparación con los factores ambientales y de la interacción genotipo x ambiente, aunque hubo diferencia altamente significativa entre ambientes. Este resultado contrasta con el de otras investigaciones, en las que el factor ambiental y de

interacción genotipo x ambiente son superiores que los efectos de genotipos (Palemón *et al.*, 2012; Alejos *et al.*, 2006).

CUADRO 3.3. Análisis de varianza AMMI para cuatro híbridos evaluados en ocho ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Fuente de Variación	G.L	SC	CM
Ambientes (a)	7	18081507.04	2583072.43 **
Genotipos (g)	3	54167006.91	18055668.97 **
Interacción (gxa)	21	14316864.75	681755.5
CP1	9	8885107.4	987234.15
CP2	7	3944506.8	563500.97
Error	62	39381766.9	635189.8
Total Corregido	95	127620558	
CV (%)	12.7		
Promedio	6293.4		

*, **: significancia ($p \leq 0.05$, 0.01); GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP1 y CP2: Componente principal.

En el Cuadro 3.4 se muestran los rendimientos medios por hectárea de cada genotipo en cada ambiente de prueba, las medias ambientales y de cada genotipo, promediadas por fila y por columna, y los valores del CP1 y CP2 para los genotipos y los ambientes. Los genotipos con mayor rendimiento fueron H-53 y H-57 en todos los ambientes de prueba. Los ambientes con los mayores rendimientos fueron los de Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea y Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de

70 000 plantas por hectárea. Los genotipos que obtuvieron valores absolutos más bajos del CP1, es decir, que interaccionan menos con el ambiente fueron: H-57, con 14.72, y Puma 1183 AEC2, con -17.93, al tener los valores del CP1 más cercanos a cero, se consideraron los más estables a través de ambientes (Medina *et al.*, 2002; Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012). Los ambientes que se consideran más estables con respecto a los valores absolutos del CP1 fueron: Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 70 000 plantas por hectárea (A5) con -0.28; Santa Lucía en la fecha de siembra 1, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A3) con 5.12; Santa Lucía en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A7) con 9.15 y, Cuautitlán en la fecha de siembra 1, con densidad de siembra de 70 000 plantas por hectárea (A2) con -9.3 (Cuadro 3.4).

Se observó que el híbrido H-53 tuvo un rendimiento promedio superior a la media, mientras que los otros tres híbridos mostraron rendimientos menores a la media (Figura 3.1). El híbrido Puma 1183 AEC1 tuvo el rendimiento promedio más bajo. Los híbridos con valores bajos en el CP1 y que interaccionan menos con el ambiente son: H-57 y Puma 1183 AEC2; mientras que los que más interaccionan con el ambiente por sus valores altos de CP1 son: H-53 y Puma AEC1. Y de manera más precisa se logró identificar a los ambientes A5, A3, A7 y A2, como los más estables, es decir, los que tienen menos variación entre ellos.

Cuadro 3.4. Rendimiento medio en kg ha⁻¹ de cuatro genotipos de maíz evaluados en ocho ambientes y valores de los dos primeros componentes principales para genotipos y ambientes. FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Genotipo	Ambiente								Media (kg ha ⁻¹)	CP1	CP2
	Cuautitlán		Santa Lucía		Cuautitlán		Santa Lucía				
	F1 D1	F1 D2	F1 D1	F1 D2	F2 D1	F2 D2	F2 D1	F2 D2			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8			
Puma 1183 AEC1	5624.5	5709.6	4880	4723.9	6007.6	5859.7	5147.4	5090.3	5380.4	-22.66	-16.4
Puma 1183 AEC2	5793.5	6384.4	5146.2	5698.1	6372.3	7543.1	5727.8	6191.4	6107.1	-17.93	12.9
H-53	6128.9	7409.4	7180.9	7714.6	7634.2	7507.4	7775.3	8156.6	7469.6	25.87	-17.03
H-57	5118.6	6091.8	5391	6785.5	6737.8	7356.2	5937.4	6313.9	6216.5	14.72	20.5
Media (kg ha ⁻¹)	5728.7	6398.8	5649.5	6230.5	6766.1	6971.35	6147	6438.1			
CP1	-25.8	-9.3	5.12	21.4	-0.28	-14.3	9.15	14.02			
CP2	-10.6	-3.1	-14.3	11.1	8.8	22.2	-10.64	-3.52			

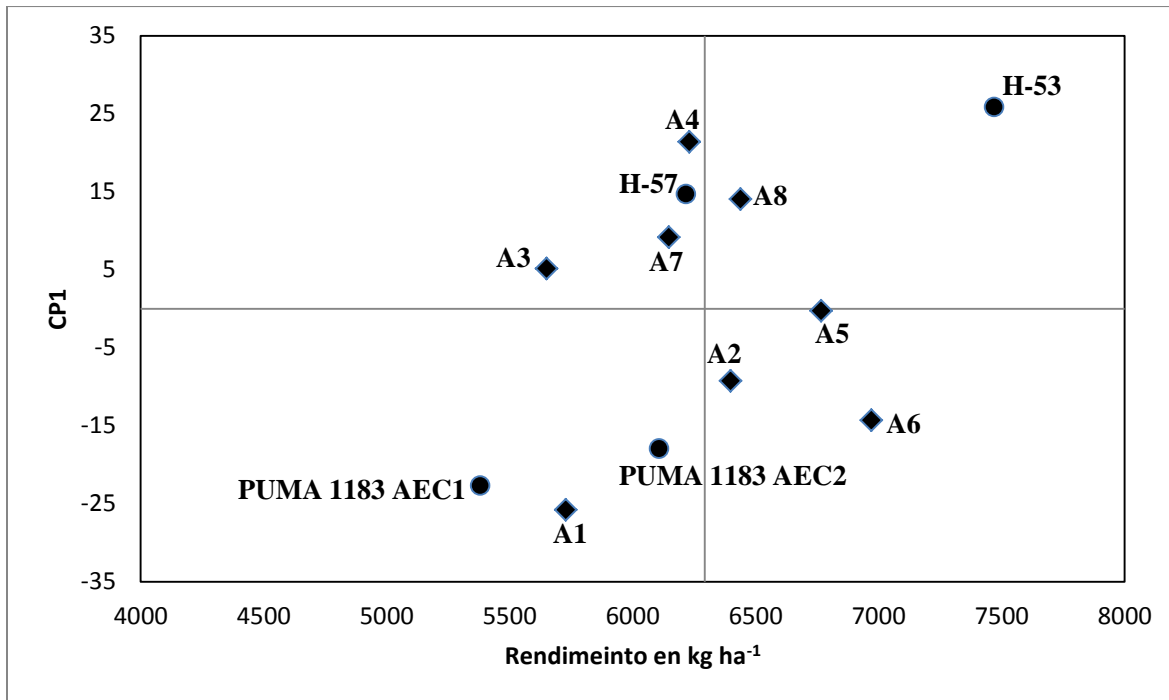


Figura 3.1. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de cuatro híbridos trilineales de maíz evaluados en ocho ambientes en la FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012. Los círculos representan los genotipos y los rombos a los ambientes.

En el análisis AMMI, el primer componente principal (CP1) explicó el 60.5% de la suma de cuadrados, y el segundo componente principal (CP2) explicó el 26.8% de la suma de cuadrados, por lo que entre los dos componentes principales describieron en un 87.3% el efecto de la interacción genotipo x ambiente. Por otro lado, con respecto a los ambientes, Yan *et al.* (2000) señalan que los ambientes cuyos ángulos sean menores a 90° clasificarán a los genotipos de manera semejante. En este caso, en particular se formaron dos grupos de ambientes con comportamientos similares; en el primero se encontraron los ambientes: A1, A2, A5 y A6, y en el segundo grupo se ubicaron los ambientes A3, A4, A7 y A8, siendo los ambientes A1, A4 y A6, los que mejor discriminaron a los genotipos.

Por su parte, Eeuwijk (2006) indica que un ángulo menor de 90° o mayor de 270° entre el vector de un cultivar y un vector de sitio indican que el cultivar tiene una respuesta positiva al sitio de prueba. Una respuesta negativa del cultivar es indicada con ángulos mayores de 90° y menores de 270° . Lo anterior concuerda con los resultados del gráfico biplot (Figura 3.2), donde H-53 se comportó mejor en los ambientes A7, A8, A3 y A4; H-57 se comportó mejor en los ambientes A4, A8 y A6; Puma 1183 AEC2 se comportó mejor en los ambientes A5, A6, y A2; Puma 1183 AEC1 se comportó mejor en los ambientes A5, A2 y A1. Así, los genotipos que se encontraron más cerca al origen en el gráfico Biplot, fueron los genotipos que interaccionan menos con el ambiente y fueron por lo tanto los más estables, mientras que por el contrario, los más alejados mostraron mayor variación en su comportamiento (Yan *et al.*, 2000). Estos resultados muestran que los genotipos más estables fueron Puma 1183 AEC2 y H-57, mientras que los genotipos que más interaccionaron con el ambiente fueron H-53 y Puma 1183 AEC1.

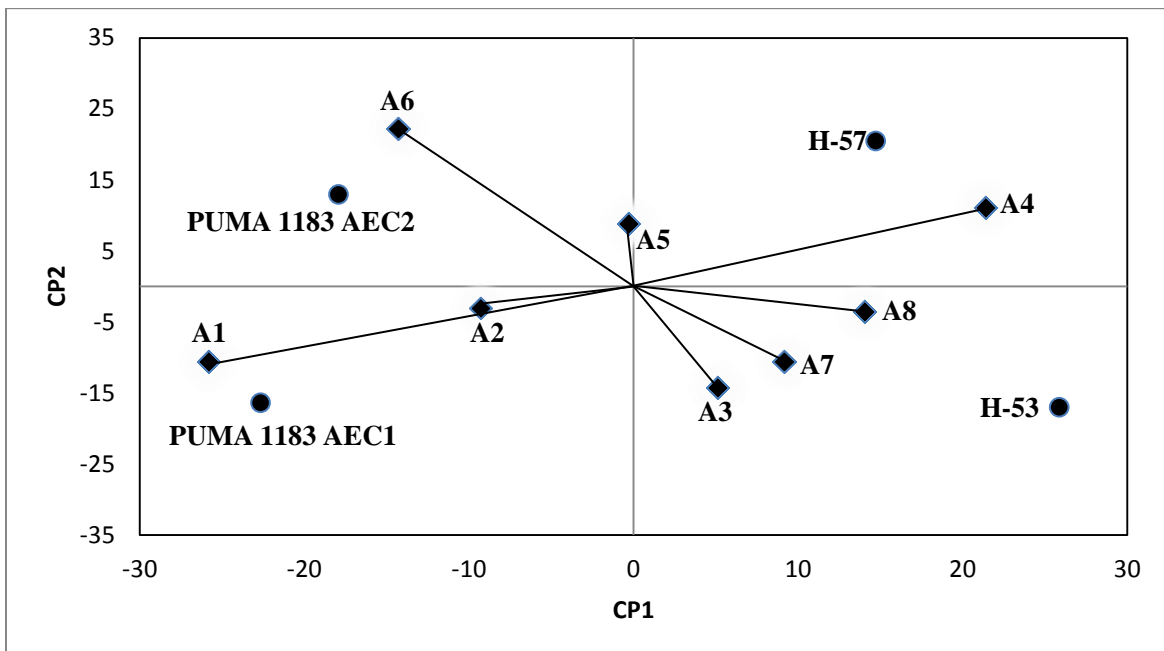


Figura 3.2. Biplot AMMI para cuatro híbridos trilineales de maíz. Los puntos representan a los híbridos trilineales y los vectores representan a los ambientes.

El análisis de varianza de los Parámetros de Estabilidad de Eberhart y Russell (1966) (Cuadro 3.5), se pudo observar que para el rendimiento, no detectó significancia entre ambientes, genotipos, y para la interacción genotipo x ambiente para el rendimiento. Esto indica que entre ambientes, las condiciones ambientales tuvieron un comportamiento similar, lo que causó un efecto no significativo sobre el rendimiento, mientras que para genotipos, aun cuando provienen de diferente origen genético su comportamiento promedio de todos los ambientes fue muy parecido entre los cuatro híbridos trilineales. La interacción genotipo x ambiente, al no ser significativa, indica que no hubo una respuesta diferencial de los genotipos a través de los diferentes ambientes de prueba.

Cuadro 3.5. Análisis de varianza de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell para cuatro híbridos de maíz evaluados en cuatro ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Fuente de Variación	G.L	SC	CM
Ambientes (a)	7	6472783	924683.3
Genotipos (g)	3	17480107	5826702.2
G X A	21	5102328.5	242968
Interacción (gxa) lineal	3	969077.7	323025.9
Desviaciones conjuntas	24	4133250.8	142218.8
Error conjunto	48	19497941	406207.1
CV (%)	17.6		
Promedio	6285.6		

*, **: significancia ($p \leq 0.05$, 0.01); GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP1 y CP2: Componente principal.

De acuerdo con los parámetros de estabilidad estimados, el coeficiente de regresión (b_i) y la desviación de regresión (δ_{di}^2) (Cuadro 3.6), y utilizando la clasificación de adaptabilidad de Carballo y Márquez (1970), se determinó que los cuatro genotipos pueden ser considerados como estables, ya que los coeficientes de regresión fueron significativamente no diferentes de 1, concordando esto con los resultados de un trabajo similar de Mejía *et al.* (2003). Por otro lado las desviaciones de regresión no presentaron diferencias significativas y se consideró que sus valores fueron iguales a cero, coincidiendo con los resultados obtenidos por Rodríguez *et al.* (2002), quien interpretó que el modelo lineal no es apropiado para describir la respuesta de los genotipos en función del efecto ambiental, ya que como es conocido, el efecto de interacción genotipo x ambiente es un efecto multiplicativo, que siempre está presente, aun cuando la interacción resulte no significativa.

Cuadro 3.6. Rendimiento medio, coeficiente de regresión (b_i), desviaciones de regresión (δ_{di}^2) de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell de cuatro híbridos evaluados en cuatro ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Genotipo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	b_i	δ_{di}^2
PUMA 1183 AEC1	5380.4	0.5286	-213063.97
PUMA 1183 AEC2	6107.1	1.3304	-292066.93
H-53	7438.4	0.7117	-121018.54
H-57	6216.6	1.4293	-309803.83

*, **: significancia ($p \leq 0.05$, 0.01); SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación.

En este trabajo fue necesario definir la mejor metodología para caracterizar a los genotipos y ambientes más estables, para esto, se compararon los valores del primer componente principal (CP1) correspondientes a la metodología AMMI, y los valores de los índices ambientales correspondientes a la metodología de los parámetros de estabilidad. En el Cuadro 3.7 se presenta la comparación de las dos metodologías para los diferentes ambientes de prueba. El modelo AMMI identificó como ambientes estables a los: A5, A3, A7 y A2, por tener valores del CP1 más cercanos a cero, mientras que los ambientes más inestables fueron: A1, A4, A6 y A8, por tener los valores del CP1 más alejados de cero; el modelo de los parámetros de estabilidad identificó como ambientes estables a: A6, A5, A8 y A2, por los valores de su índice ambiental positivos, es decir, superiores a la media general, y los ambientes más inestables fueron: A1, A3, A7 y A4, por tener índices ambientales negativos, es decir, menores a la media general. La correspondencia que existió entre ambos modelos fue del 50%, ya que coincidieron ambos modelos en determinar a dos ambientes estables y dos ambientes inestables, de los ocho ambientes de prueba.

En la comparación del modelo AMMI con el de Eberhart y Russell para identificar a los genotipos más estables (Cuadro 3.8), se identificó que para AMMI que los genotipos más estables fueron H-57 y Puma 1183 AEC2, por sus valores del CP1 más cercanos a cero. Para el modelo de los parámetros de estabilidad, todos los genotipos fueron estables. La correspondencia entre ambos modelos fue del 50%, ya que sólo dos de los cuatro genotipos evaluados coincidieron como estables por ambos modelos, de los cuatro genotipos evaluados en los diferentes ambientes de prueba, resultados similares a los reportados por Córdova (1991), quien obtuvo un 40% de coincidencia al utilizar ambas metodologías.

Cuadro 3.7. Comportamiento medio del rendimiento en los ocho ambientes evaluados, componente principal uno (CP1) e índices ambientales. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Ambientes	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	CP1	Índice ambiental
A1	5728.4	-25.8	-619.4
A2	6398.8	-9.3	113.2
A3	5649.5	5.1	-636.1
A4	6230.5	21.4	-55.1
A5	6766.1	-0.28	402.4
A6	6971.3	-14.3	781
A7	6147	9.1	-138.6
A8	6438.1	14	152.5

*, **: significancia ($p \leq 0.05$, 0.01); GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP1 y CP2: Componente principal.

Cuadro 3.8. Comportamiento medio del rendimiento de los cuatro híbridos evaluados, componente principal uno (CP2) y coeficiente de regresión. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Genotipo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	CP1	<i>b_i</i>
PUMA 1183 AEC1	5380.4	-22.7	0.5286
PUMA 1183 AEC2	6107.1	-17.9	1.3304
H-53	7438.4	25.9	0.7117
H-57	6216.6	14.7	1.4293

*, **: significancia ($p \leq 0.05$, 0.01); GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP1 y CP2: Componente principal.

3.5.2 Cruzas simples.

El análisis de varianza AMMI de las cruzas simples (Cuadro 3.9) detectó diferencias altamente significativas para rendimiento entre ambientes, entre genotipos y significancia para la interacción genotipo x ambiente.

Las diferencias entre los dieciséis ambientes de prueba se debieron principalmente a las diferentes condiciones ambientales (precipitación, temperatura, humedad, tipo de suelo y prácticas agronómicas) en que se desarrolló el cultivo. Por otro lado, las diferencias entre las cinco cruzas simples se debieron a que éstas no están emparentadas o a que su origen genético es diferente. Con respecto a la interacción, las diferencias observadas en la interacción genotipo x ambiente indicaron que hubo una respuesta diferencial de los genotipos a través de los diferentes

ambientes de prueba, por lo que fue necesario utilizar los dos modelos para realizar una mejor descripción de la interacción genotipo x ambiente.

En la suma de cuadrados total, el efecto de ambientes contribuyó con un 17.8%, la interacción genotipos x ambientes con 12.7%, y el 54.4% corresponde al efecto de genotipos. Así los genotipos, en su conformación, contribuyeron en mayor proporción a la variación del rendimiento, en comparación con los factores ambientales y de interacción genotipo x ambiente.

Cuadro 3.9. Análisis de varianza AMMI para cinco cruza simples evaluadas en dieciséis ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Fuente de Variación	G.L	SC	CM
Ambientes (a)	15	274263686.7	18284245.8 **
Genotipos (g)	4	839179826	209794956.5 **
Interacción (gxa)	60	195759061.7	3262651**
CP1	18	109064955.8	6059164.2 **
CP2	16	52643148.7	3290196.8 **
Error	158	225060674	1424435
Total Corregido	239	1541670257	
CV (%)	19.1		
Promedio	6231.5		

*, **, ns: significativo ($p \leq 0.05$, 0.01) y no significativo; GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP: Componente principal.

Para el rendimiento medio de las cruza simples en los diferentes ambientes de prueba, se observó que la Cruza Simple Puma 1183 AEC1 Androestéril, la Cruza Simple Puma 1183 AEC1

Fértil, y la Cruza Simple H-57 Androestéril, tuvieron los rendimientos más altos en el ambiente A8 (Cuadro 3.10): Santa Lucía, Texcoco, fecha de siembra uno, densidad de población 80 000 plantas por hectárea; la Cruza Simple Puma 1183 AEC2 Fértil tuvo el rendimiento más alto en el ambiente A2: Cuautitlán Izcalli, fecha de siembra uno, densidad de población 55 000 plantas por hectárea; la Cruza simple H-57 Fértil tuvo el rendimiento más alto en el ambiente A12: Cuautitlán Izcalli, fecha de siembra dos, densidad de población 80 000 plantas por hectárea, y además ésta tuvo el rendimiento más alto de las cruza simples.

Además, destacaron por su mayor rendimiento promedio las cruza simples H-57 Androestéril y Fértil, mientras que los ambientes que tuvieron los rendimientos medios más altos fueron: A8, A7 y A6 (en orden descendente), que corresponden a la localidad de Santa Lucía, Texcoco, en la primera fecha de siembra, con las densidades de población de 80 000, 70 000 y 55 000 plantas por hectárea, respectivamente; el A12, que corresponde a Cuautitlán Izcalli, en la segunda fecha de siembra, con la densidad de población de 80 000 plantas por hectárea.

Por otro lado, las cruza simples que se identificaron con mayor estabilidad por el valor de su primer componente principal (CP1) más cercano a cero fueron: H-57 Androestéril con valor de CP1 de 0.77, y H-57 Fértil con valor de CP1 de 29.1. Los ambientes más estables por su valor de CP1 más cercano a cero fueron: A11, A13, A14, A15, A5, A7, A12, A6 y A10 (en orden descendente). La mayoría de los ambientes con mejor estabilidad se ubicaron en la segunda fecha de siembra de ambas localidades, lo que indicó que las condiciones ambientales como las precipitaciones fueron favorables para el desarrollo de las cruza simples en las condiciones en las que se manejaron los experimentos.

Se identificó que las cruza simples H-57 AE y H-57 F tuvieron rendimientos promedios superiores a la media, y que presentaron valores bajos en el CP1 e interaccionan menos con el ambiente, mientras que los que más interaccionan con el ambiente por sus valores altos de CP1

fueron las cruzas simples Puma 1183 AEC2 Fértil, Puma AEC1 Fértil y Puma AEC1 Androestéril (Figura 3.3).

Los ambientes que tuvieron rendimientos mayores a la media fueron A4, A6, A7, A8, A10, A11 y A12; los ambientes A11, A13, A14, A15, A5, A7, A12, A6 y A10 presentaron valores bajos en el CP1 y menos variación entre ambientes, mientras que los que más variación presentan entre ambientes por sus valores altos de CP1 fueron los ambientes A2, A8, A16 y A4.

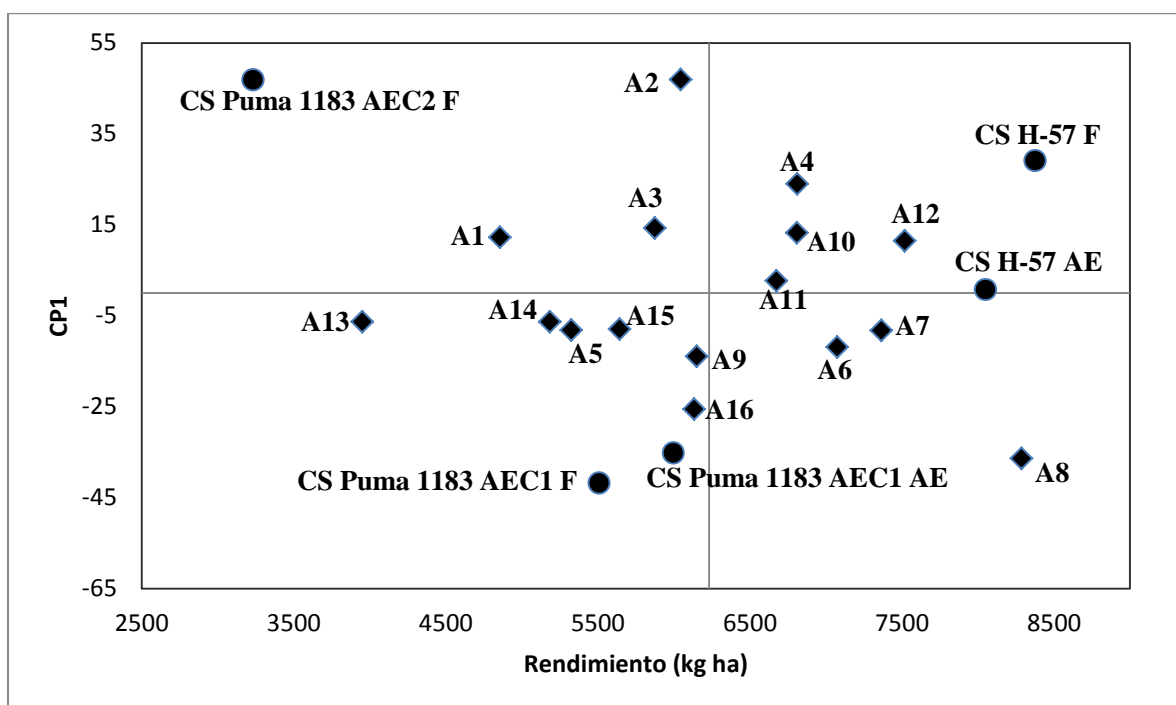


Figura 3.3. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de cinco cruzas simples evaluados en dieciséis ambientes en la FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012. Los círculos representan a los genotipos y los rombos representan a los ambientes.

Cuadro 3.10. Rendimiento medio en kg ha⁻¹ de cinco cruza simples de maíz evaluadas en dieciséis ambientes y valores de los dos primeros componentes principales para genotipos y ambientes.

Genotipo	Ambiente																Media	CP1	CP2
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16			
CS1	4880	4314	5728	5353	5943	7284	6910	8958	5521	5505	6414	5867	4273	5177	6567	7239	5995.8	-35.1	-18.3
CS2	3040	3422	3964	5693	5108	7046	6995	9303	7052	5641	5892	6633	3543	4496	4205	6088	5507.5	-41.7	-0.14
CS3	2658	5326	4241	5263	3121	3822	3211	3086	3376	4022	3246	3627	1432	1594	1659	2003	3230.5	46.9	-41.2
CS4	6715	7457	8273	8187	6179	8513	9822	10053	7899	9493	7857	9967	5362	7372	7700	7937	8049	0.77	15.9
CS5	6982	9707	7165	9555	6279	8710	9888	10036	6905	9389	9962	11504	5144	7286	8085	7397	8374.6	29.1	43.7
Media (kg ha⁻¹)	4855	6045	5874	6810	5326	7075	7365	8287	6151	6810	6674	7519	3951	5185	5643	6133			
CP1	12.2	46.9	14.3	24.01	-8.15	-11.9	-8.2	-36.4	-13.9	13.2	2.67	11.4	-6.3	-6.3	-7.99	-25.5			
CP2	-9.0	-1.5	-20.5	-4.3	-27.6	-6.2	18.7	13.3	-15.3	10.4	13.8	36.5	-18.6	5.8	8.6	-3.99			

CS1: Cruza Simple Puma 1183 AEC1 Androestéril; CS2: Cruza Simple Puma 1183 AEC1 Fértil; CS3: Cruza Simple Puma 1183 AEC2 Fértil; CS4: Cruza Simple H-57 Androestéril; CS5: Cruza simple H-57 Fértil.; A1 – A16: Ambientes.

En el análisis AMMI, el primer componente principal (CP1) explicó el 55.7% de la suma de cuadrados, y el segundo componente principal (CP2) explicó el 26.9% de la suma de cuadrados, por lo que los dos componentes principales describieron un 82.6% del efecto de la interacción genotipo x ambiente. En lo que corresponde a los ambientes, Yan *et al.* (2000) señalan que los ambientes cuyos ángulos sean menores a 90° clasificarán a los genotipos de manera semejante. En este caso, se identificó que los ambientes A2, A8 y A12, fueron los que mejor discriminan a los genotipos (Figura 3.4).

La craza simple Puma 1183 AEC2 F se comportó mejor en los ambientes A1, A3 y A4; la craza simple H-57 F se comportó mejor en los ambientes A10, A12 y A11; la craza simple H-57 AE se comportó mejor en los ambientes A11, A12, A14 y A15; la craza simple Puma 1183 AEC1 F se comportó mejor en los ambientes A14, A15, A6, A16 y A8; la craza simple Puma 1183 AEC1 AE se comportó mejor en los ambientes A6, A9 y A16. Así, los genotipos que se ubicaron más cerca al origen en el gráfico Biplot, fueron los genotipos que interaccionaron menos con el ambiente y fueron los más estables, los cuales fueron: las cruzas simples H-57 AE y H-57 F, mientras que las cruzas simples Puma 1183 AEC1 F y Puma 1183 AEC2 F fueron las que más interaccionaron con el ambiente.

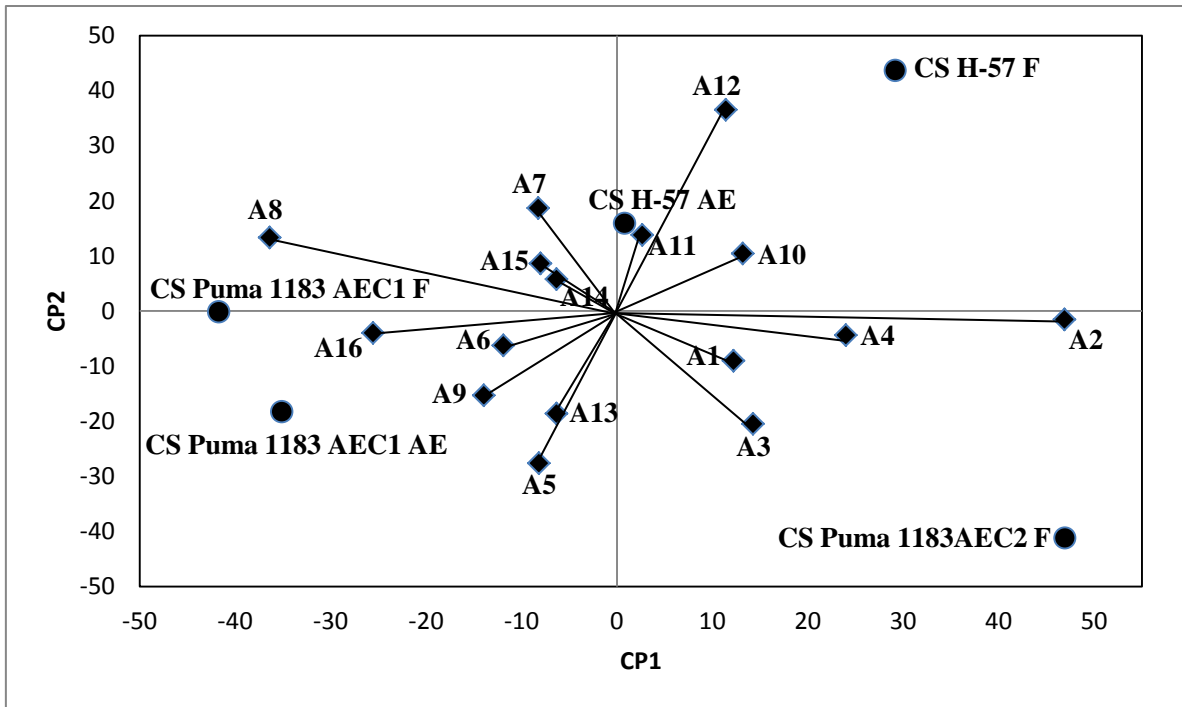


Figura 3.4. Biplot AMMI para cinco cruzas simples. Los puntos representan a los híbridos trilineales y los vectores representan a los ambientes.

El análisis de varianza de los parámetros de estabilidad (Cuadro 3.11), no detectó significancia para ambientes, para genotipos y en la interacción genotipo x ambiente para rendimiento, debido a que las condiciones ambientales se comportaron de manera similar, lo que causó un efecto no significativo sobre el rendimiento, y entre los genotipos, aún al ser de origen genético diferente su comportamiento fue muy parecido en las cinco cruzas simples en promedio de todos los ambientes. La interacción genotipo x ambiente, al no haber significancia, indica que este modelo no detectó un comportamiento diferencial de los genotipos a las diferentes condiciones ambientales prevalentes en los diferentes ambientes de prueba.

Cuadro 3.11. Análisis de varianza de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell para cinco cruza simples evaluadas en dieciséis ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Fuente de Variación	G.L	SC	CM
Ambientes (a)	15	91421337	6094755.8
Genotipos (g)	4	279726672	69931668
G x A	60	65252354	1087539.2
Interacción (gxa) lineal	4	9115274.8	2278818.7
Desviaciones conjuntas	70	56137079	801958.3
Error conjunto	128	64820779	506412.3
CV (%)	19.8		
Promedio	6231.5		

*, **, ns: significativo ($p \leq 0.05$, 0.01) y no significativo; GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP: Componente principal.

Los resultados obtenidos con los parámetros de estabilidad de las cruza simples, indican que el coeficiente de regresión (b_i) y las desviaciones de regresión (δ_{di}^2) presentaron diferencias significativas en sus valores (Cuadro 3.12). Al utilizar la clasificación de adaptabilidad de Carballo y Márquez (1970), se observó que las cruza simples no cumplieron los requisitos para ser consideradas como estables. Las cruza simples PUMA 1183 AEC1 AE y PUMA 1183 AEC2 F presentaron buena respuesta en ambientes desfavorables pero fueron inconsistentes; las cruza simples PUMA 1183 AEC1 F y H-57 F presentaron buena respuesta en ambientes favorables pero igual fueron inconsistentes; la cruza simple H-57 Androestéril, por su valor de desviación de

regresión se consideró que tuvo buena respuesta en ambientes favorables y fue consistente, a su vez, es la que presentó mayor estabilidad de las cruzas simples evaluadas.

Cuadro 3.12. Rendimiento medio, coeficiente de regresión (b_i), desviación de regresión (δ_{di}^2) de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell de las cinco cruzas simples evaluadas en dieciséis ambientes FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Genotipo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	b_i	δ_{di}^2
CS PUMA 1183 AEC1			
Androestéril	5995.8	0.7621*	306459.36 **
CS PUMA 1183 AEC1 Fértil	5507.5	1.2805*	404301.11 **
CS PUMA 1183 AEC2 Fértil	3230.5	0.5095	650621.67 **
CS H-57 Androestéril	8049.2	1.1183*	-231987.78
CS H-57 Fértil	8374.6	1.3296*	348335.34 **

CS: Cruza Simple; *, **: significancia ($p \leq 0.05, 0.01$); SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación.

En la comparación de las dos metodologías, en los resultados para los diferentes ambientes de prueba el modelo AMMI identificó como ambientes estables a: A11, A13, A14, A15, A5, A7, A12, A6 y A10, por tener valores del CP1 más cercanos a cero, mientras que los ambientes más inestables fueron: A2, A8, A16 y A4, por tener los valores del CP1 más alejados de cero; el modelo de los parámetros de estabilidad identificó como ambientes estables a: A8, A12, A7, A6, A4, A10 y A11, por los valores de sus índices ambientales positivos, es decir, superiores a la media general, y los ambientes con mayor inestabilidad fueron: A13, A1, A14 y A5, por tener índices

ambientales negativos, es decir, menores a la media general. La correspondencia que existe entre ambos modelos fue del 25%, debido a que ambos modelos sólo coincidieron en determinar a cuatro ambientes estables, de los dieciséis ambientes de prueba (Cuadro 3.13).

Cuadro 3.13. Comportamiento medio del rendimiento en los dieciséis ambientes evaluados, componente principal uno (CP1) e índices ambientales. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Ambientes	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	CP1	Índice ambiental
A1	4855.02	12.2187	-1376.48
A2	6045.24	46.9108	-186.26
A3	5874	14.2881	-357.5
A4	6810.33	24.0106	578.83
A5	5325.97	-8.1516	-905.53
A6	7075.14	-11.8701	843.64
A7	7365.17	-8.232	1133.67
A8	8287.38	-36.358	2055.88
A9	6150.59	-13.916	-80.91
A10	6810.26	13.1876	578.76
A11	6674.32	2.6719	442.82
A12	7519.44	11.4242	1287.94
A13	3950.91	-6.3303	-2280.59
A14	5185.07	-6.3098	-1046.43
A15	5643.11	-7.9909	-588.39
A16	6132.67	-25.553	-98.83

*, **: significancia ($p \leq 0.05$, 0.01); GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP1 y CP2: Componente principal.

La comparación de los dos modelos para identificar a los genotipos más estables (Cuadro 3.14), indica que para el modelo AMMI las cruzas simples más estables fueron: H-57 AE y H-57 F, por sus valores del CP1 más cercanos a cero. Para el modelo de los parámetros de estabilidad, las cruzas simples H-57 AE, PUMA 1183 AEC1 AE y Puma 1183 AEC1 F fueron los más estables por sus valores de coeficiente de regresión más cercanos a la unidad. La correspondencia entre ambos modelos fue del 20%, ya que ambos modelos coincidieron en identificar una sola craza simple a través de los diferentes ambientes de prueba.

Cuadro 3.14. Comportamiento medio del rendimiento de las cinco cruzas simples evaluadas, componente principal uno (CP1) y coeficiente de regresión. FESC UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2012.

Genotipo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	CP1	<i>b_i</i>
CS PUMA 1183 AEC1 Androestéril	5995.81	-35.1274	0.7621*
CS PUMA 1183 AEC1 Fértil	5507.54	-41.7434	1.2805*
CS PUMA 1183 AEC2 Fértil	3230.49	46.9313	0.5095
CS H-57 Androestéril	8049.2	0.7865	1.1183*
CS H-57 Fértil	8374.65	29.153	1.3296*

*, **: significancia ($p \leq 0.05, 0.01$); GL: Grados de libertad; SC: Suma de cuadrados; CM: Cuadrados medios; CV: Coeficiente de variación; CP1 y CP2: Componente principal.

De manera general, al evaluar la estabilidad de los híbridos trilineales y de las cruzas simples, se identificó que el mejor modelo para analizar la interacción genotipo x ambiente, fue el AMMI en comparación con los parámetros de estabilidad. Esto debido a que la interacción genotipo por ambiente debe ser analizada como un efecto

multiplicativo y no sólo como un efecto lineal; con el uso del Biplot se pudo explicar fácilmente la interacción genotipo x ambiente utilizando los valores de los componentes principales y del rendimiento.

3.6 CONCLUSIONES

Los híbridos trilineales H-57 y Puma 1183 AEC2, y las cruzas simples o híbridos de crusa simple H-57 Androestéril y H-57 Fértil, presentaron estabilidad y mejores rendimientos por las condiciones en las que se llevó a cabo este trabajo.

Los ambientes más estables para los híbridos trilineales fueron: Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A5); Santa Lucía en la fecha de siembra 1, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A3); Santa Lucía en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A7) y, Cuautitlán en la fecha de siembra 1, con densidad de siembra de 70 000 plantas por hectárea (A2).

Los ambientes más estables para las cruzas simples fueron: A11 en Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 70 000 plantas por hectárea; A13, A14 y A15: Santa Lucía en la fecha de siembra 2, con densidades de siembra de 40 000, 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, respectivamente; A5, A6 y A7, en Santa Lucía en la fecha de siembra 1, con densidades de siembra de 40 000, 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, respectivamente; A10 y A12: Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, respectivamente.

Al evaluar la estabilidad de los híbridos trilineales y de las cruzas simples, se identificó que el mejor modelo para analizar la interacción genotipo x ambiente por su mayor potencial de rendimiento y estabilidad, fue el modelo AMMI en comparación a los parámetros de estabilidad. Debido a que la interacción genotipo por ambiente debe ser analizada como un efecto multiplicativo y no sólo como un efecto lineal, además de

que al hacer uso del Biplot, se pudo explicar fácilmente la interacción genotipo x ambiente, utilizando los valores de los componentes principales y del rendimiento.

3.7 LITERATURA CITADA

- Alejos G., Monasterio P., Rea R. 2006. Análisis de la interacción genotipo-ambiente para el rendimiento de maíz en la región maicera del estado de Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 56(3) 369-384.
- Carballo C., A. y Márquez S., F. 1970. Comparación de variedades de maíz de El bajío y la mesa central por su rendimiento y estabilidad. *Agrociencia*. UACH. México, D. F, p. 129-146.
- Cooper M., Podlich. 1999. Genotipe x environment interactions, selection response and heterosis. *In* Coors J. G., Pandey S. (eds.), *The Genetics and Exploitation of Heterosis In Crops*. Crop Science Society of America. CIMMYT. Madison, Wisconsin, USA. pp. 81-92.
- Córdova H. S. 1991. Estimación de parámetros de estabilidad para determinar la respuesta de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a Ambientes Contrastantes de Centroamérica, Panamá y México. *Agronomía Mesoamericana*. 2. 1-10.
- Crossa J., Burgueño J., Cornelius P. L., McLaren G., Trethowan R., Krishnamachari A. 2006. Modeling genotype x environment interaction using additive genetic covariances of relatives for predicting breeding values of wheat genotypes. *Crop Science* 46: 1722- 1733.
- Crossa J., Gauch H. G., Zobel R. 1990. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science* 30:493-500.

- Crossa, J., Cornelius P. L. 2000. Modelos lineales bilineales para el análisis de ensayos de genotipos en ambientes múltiples. In: Simposium: Interacción Genotipo x Ambiente. XIII Congreso Nacional de Fitogenética. Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C. 15-20 de octubre. Irapuato, México. pp: 61-88.
- Eberhart S., Russell A. W. 1966. Stability parameters for comparing varieties. Crop Science. Vol. 6. p. 36-40.
- Eeuwijk F. V. 2006. Genotype by Environment Interaction. Basics and Beyond. pp. 155-170. In Lamkey K. R., Lee M. eds., Plant Breeding: The Arnel R. Hallauer. International Symposium. 2003 México city, México.
- Espinosa C., A., Carballo C., A. 1986. Productividad y calidad de semillas en líneas e híbridos de maíz (*zea mays* l.) Para la Zona de Transición de México. Fitotecnia 8:1-25.
- Espinosa C. A., Ortíz C. J., Ramírez F. A., Gómez M. N. O., Martínez G. A. 1998. Estabilidad y comportamiento de líneas *per se* y cruzas de maíz en la producción de semilla. Agricultura Técnica en México. 24(1). 27-36.
- Espinosa Calderón A., Tadeo Robledo M., Gómez Montiel N., Virgen Vargas J., Sierra Macías M., Palafox Caballero A., Zamudio González B., Arteaga Escamilla I., Canales Islas E. I., Martínez Yáñez B., Vázquez Carrillo G., Valdivia Bernal R. 2012a. H-53 AE1: Híbrido de maíz para Valles Altos y Zona de Transición con esterilidad masculina para producción de semilla. Memoria Técnica no. 13. Campo Experimental Valle de México. Vol.13, pág.38-40. Memorias de congresos.
- Espinosa Calderón A., Tadeo Robledo M., Gómez Montiel N., Virgen Vargas J., Sierra Macías M., Palafox Caballero A., Zamudio González B., Arteaga Escamilla I., Canales Islas E. I., Martínez Yáñez B., Vázquez Carrillo G., Valdivia Bernal R.

- 2012b. H-57 AE: Híbrido de maíz para valles altos con esterilidad masculina para producción de semilla. Memoria Técnica no. 13. Campo Experimental Valle de México. Vol.13, pág.41-44. Memorias de congresos.
- Finlay, K. W., Wilkinson G. N. 1963. The analysis of adaptation in plant breeding programme. Austr. J. Agric. Res. 14: 742-754.
- Fuentes, L. M. R., Quemé W. 2005. Evaluación de híbridos de maíz de gano amarillo y blanco en diferentes ambientes de México y Centro América. Informe del PCCMA Guatemala Abril 2005.
- Gauch, H. G. 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI Analysis of Factorial Designs. Elsevier Science Publishers, USA. p. 278.
- Márquez S. F. 2009. De las variedades criollas de maíz a los híbridos transgénicos. II. La hibridación. Agricultura, Sociedad y Desarrollo. 6(2). 161-176.
- Márquez S. F. 1973. Relationship between genotype-environment interaction and stability parameters. Crop Science. 13: 577-579.
- Mastache L. A., Martínez G. A. 1996. Un algoritmo para obtener los indicadores de estabilidad de Eberhart y Russell. Comunicaciones en Estadística y Computo.
- Medina, S., C. Marín, V. Segovia, A. Bejarano, Z. Venero, R. Ascanio y E. Meléndez. 2002. Evaluación de la estabilidad del rendimiento de variedades de maíz en siete localidades de Venezuela. Agronomía Tropical 52(3). 255-275.
- Mejía C. J. A., Molina G. J. D. 2003. Cambios de estabilidad en el rendimiento de variedades tropicales de maíz. Revista Fitotecnia Mexicana. 26(2): 89-94.
- Palemón A. F., Gómez M. N. O., Castillo G. F., Ramírez V. P., Molina G. J. D., Miranda C. S. 2012. Estabilidad de cruas intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. Agrociencia. 46. 133-145.

- Rodríguez P. J. E., Sahagún C. J., Villaseñor M. H. E., Molina G. J. D., Martínez G. A. 2002. Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.) de temporal. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 25(2). 143-151.
- SAS, Statistical Analysis System Institute. 2002. The SAS System for Windows. SAS Institute Inc. Cary, NC 27513, USA.
- Sierra M. M., Palafox C. A., Rodríguez M. F. A., Espinosa C. A., Gómez M. N., Caballero H. F., Barrón F. S., Sandoval R. A., Vázquez C. G. 2006. H-518, híbrido trilineal de maíz para el trópico húmedo de México. *Agricultura Técnica en México*. 32(1). 115-119.
- Vargas, M., Crossa J. 2000. The AMMI Analysis and Graphing the Biplot. *Biometrics and Statistical Unit, CIMMYT. México*. 42 p.
- Yan, W., Hunt L. A., Sheng Q., Szlavnic Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Science*. 40: 597-605.
- Yan, W. 2001. GGE-biplot- a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*. 93:1111-1118.
- Zobel R. W., Wright M., Gauch H. G.. 1998. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*. 80: 88-397.

IV. DISCUSIÓN GENERAL

En todos los casos, los híbridos trilineales y sus cruzas simples progenitoras, tienen en la estructura genética de sus progenitores, el carácter de esterilidad masculina génica citoplásmica tipo “C”, ubicada y posteriormente verificada en la FESC-UNAM, desde 1992. Se ha verificado que este tipo de androesterilidad se mantiene estable en diferentes ambientes, desde altitudes muy bajas en climas tropicales (CECOT, CEIGIA) y subtropicales, hasta los Valles Altos de México (2200-2600 m). También se podría señalar que ésta tiene cierta similitud con la esterilidad masculina citoplásmica Tipo Charrua (CMS-C), lo que podría verificarse en un futuro, en trabajos al respecto. En diversos trabajos y después de 22 años, la fuente que se maneja en los programas de ambas instituciones (FESC-UNAM e CEVAMEX-INIFAP), ha demostrado que se mantiene estable es decir, que se mantienen androestéril en todos los ambientes de prueba, y no cambia a fértil por los cambios en las condiciones ambientales. A la fecha el INIFAP registró ante el Catalogo Nacional de Variedades Vegetales y la UPOV al híbrido H-51 AE (Espinosa et al., 2012) y la UNAM está en proceso de registrar el híbrido de maíz Tsiri Puma (Tadeo, 2014: Comunicación personal).

En la evaluación de las diferentes proporciones de semilla androestéril y fértil en la formación de los híbridos trilineales, para rendimiento, hubo diferencias altamente significativas para ambientes, genotipos y densidades; en la interacción genotipo x ambiente hubo significancia. Esto como resultado del origen genético diferente de los híbridos trilineales, lo cual es así porque los híbridos empleados en la investigación proceden de dos programas de mejoramiento genético diferentes, ubicados uno de ellos en la FESC-UNAM y otro en el CEVAMEX-INIFAP, y aun cuando existe colaboración entre ambos programas en el tema de la incorporación de la androesterilidad a los progenitores de cada programa, se mantienen diferencias genotípicas que se confirman

en el desempeño de los materiales genéticos obtenidos, como ha ocurrido en otros trabajos (Tadeo *et al.*, 2012; Tadeo *et al.*, 2013; Tadeo *et al.*, 2014; Espinosa *et al.*, 2012). Los mejores rendimientos los tuvo el híbrido H-53, con 7438 kg ha⁻¹; el ambiente con el mejor rendimiento fue en Cuautitlán Izcalli en la segunda fecha de siembra, lo que pudo atribuirse a las buenas condiciones ambientales prevalentes como fue la precipitación y el tipo de suelos, siendo los suelos vertisoles, los cuales retienen mejor la humedad que los suelos arenosos encontrados en Santa Lucía, Texcoco, y suelen ser más fértiles. La mejor densidad de población fue de 70 000 plantas por hectárea, debido claramente a que los mejores rendimientos se deben por el número de individuos presentes por unidad de área, y no por los valores de algunos de los componentes de rendimiento, ya que éstos no presentaron diferencias significativas. Las mejores proporciones de semilla fueron: 33%AE y 67%F con 6290 kg ha⁻¹; y 66%AE y 34%F con 6200 kg ha⁻¹. Todas las mezclas de semilla androestéril y fértil fueron superiores en rendimiento a la versión 100% fértil, donde pudo ser que la androesterilidad contribuye a incrementar los rendimientos en los híbridos trilineales, por tener éstos un plus de energía que seguramente la planta canaliza hacia el grano, lo anterior concuerda con resultados similares obtenidos en otros híbridos (Espinosa *et al.*, 2009; Tadeo *et al.*, 2014).

La esterilidad masculina también ayuda a mantenerla calidad genética de la semillas, en este caso en la conformación final de los híbridos trilineales. Para ello se utilizan mezclas de semilla, y se usa en mayor proporción de la hembra androestéril, con respecto al macho androfértil, y así, el productor de grano de maíz asegura la polinización y fertilización de la hembra androestéril y evita que haya contaminación por polen indeseable, cuando ocurren fallas en el desespigamiento.

No se encontraron diferencias estadísticas en las proporciones de semilla en el análisis de varianza, pudo deberse a que siempre hubo polen disponible de plantas fértiles ubicadas en unidades experimentales vecinas, por lo que siempre ocurrió la polinización y fertilización de las plantas hembra. Aunque en el comportamiento medio se identificaron dos grupos de significancia, pudo deberse a la sensibilidad con la que se realizaron ambas pruebas, en este caso destaca que la versión completamente androesteril no sería viable porque no existiría la posibilidad de que ocurriera la fecundación, pero confirma en todo caso que no hay problemas con las versiones, ya que se asume que son versiones isogénicas y se diferencian en la producción o ausencia de polen en las anteras.

De acuerdo con Becker (1981), quien propuso el concepto agronómico de variedad estable como aquella que representa una mínima interacción genotipo ambiente, asociado a la condición de obtener un incremento del rendimiento en respuesta a mejoras ambientales. Los factores ambientales causantes de la interacción genotipo x ambiente pueden ser de dos tipos: predecibles y no predecibles. Los predecibles ocurren en forma sistemática o bajo el control humano, e incluyen: tipo de suelo, fecha de siembra, espaciamiento entre surcos, densidad de siembra, frecuencia de riegos, dosis de fertilización, etc. Por otro lado, los no predecibles fluctúan de manera aleatoria, y son por ejemplo: lluvias o sequías, temperatura (calor o heladas), humedad relativa, vientos, granizadas, plagas y enfermedades, entre otros.

En la evaluación de la estabilidad y el estudio de la interacción genotipo x ambiente de los materiales de este estudio, el modelo AMMI identificó como estables a los híbridos trilineales H-57 y Puma 1183 AEC2, y a las cruzas simples H-57 AE y H-57 F, por sus valores de CP1 más cercanos a cero.

Por otra parte, en los parámetros de estabilidad los híbridos trilineales H-53, Puma 1183 AEC1 y Puma 1183 AEC2, y las cruzas simples H-57 AE, Puma 1183 AEC1 AE y Puma 1183 AEC1 F se consideraron como los estables. Los niveles de correspondencia entre ambos modelos, para los híbridos trilineales y las cruzas simples fueron del 50% y 20%, respectivamente.

Ambos modelos identificaron por lo menos a un híbrido trilineal y una craza simple como estables. El modelo AMMI describió mejor la interacción genotipo por ambiente que en los parámetros de estabilidad, pues como señalan Cruz y Salazar (1992), el segundo procedimiento generó controversias por la supuesta violación de las suposiciones de regresión, al utilizar como variables independientes a los promedios por ambiente de la variable respuesta.

Cruz (1989) por su parte indica que para la aplicación correcta del método de Eberhart y Russell, primero debe de efectuarse la prueba exacta de la interacción genotipo-ambiente. El mismo autor señala que la significación de la interacción genotipo-ambiente depende del error ponderado del diseño de bloques al azar, por lo que es necesario realizar los ajustes necesarios para hacer útil y práctico este modelo.

La evaluación de los diferentes genotipos en multiambientes y años de cultivo fue muy importante, para aumentar la confiabilidad en los procesos de selección de los materiales sobresalientes, y esto a su vez dependerá de los recursos con los que cuente el programa de fitomejoramiento, en este caso, de maíz.

V. CONCLUSIONES GENERALES

El híbrido trilineal de maíz H-53 tuvo el rendimiento medio más alto de los genotipos evaluados en los cuatro ambientes de prueba con una media de 7438 kg ha⁻¹.

El ambiente de Cuautitlán en la segunda fecha de siembra tuvo el promedio de rendimiento más alto, considerando la media de los cuatro genotipos, con un rendimiento de 6877 kg ha⁻¹.

La densidad de población de 70 000 plantas por hectárea, tuvo el mayor rendimiento con respecto a 50 000 plantas por hectárea.

La proporción de semilla, mezclando 100% semilla androestéril y 0% semilla fértil tuvo el mayor rendimiento con 6 540 kg ha⁻¹, similar estadísticamente a las proporciones de semilla con 33% androestéril y 67% fértil (6290 kg ha⁻¹), 66% androestéril y 34% fértil (6200 kg ha⁻¹), aunque la primera no es económica ni viable prácticamente, en ausencia de plantas fértiles.

Las proporciones de 100%, 33% y 66% de semilla androestéril, obtuvieron rendimientos mayores en 6.9%, 2.4%, y 1.4%, con respecto a la proporción 100% fértil, indicando que el uso de la androestridad en las diferentes proporciones de semilla, propicia incrementos en el rendimiento, en comparación con la versión completamente fértil.

Los híbridos trilineales y los híbridos de cruce simple que presentaron mayor estabilidad y mejores rendimientos fueron: H-57 y Puma 1183 AEC2 I, cruces simples H-57 Androestéril y H-57 Fértil, respectivamente.

Los ambientes más estables para los híbridos trilineales fueron: Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A5); Santa Lucía en la fecha de siembra 1, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A3); Santa Lucía en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 50 000 plantas por hectárea (A7) y, Cuautitlán en la fecha de siembra 1, con densidad de siembra de 70 000 plantas por hectárea (A2).

Los ambientes más estables para las cruzas simples fueron A11: Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de población de 70 000 plantas por hectárea; A13, A14 y A15: Santa Lucía en la fecha de siembra 2, con densidades de siembra de 40 000, 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, respectivamente; A5, A6 y A7: Santa Lucía en la fecha de siembra 1, con densidades de siembra de 40 000, 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, respectivamente; A10 y A12: Cuautitlán en la fecha de siembra 2, con densidad de siembra de 55 000 y 70 000 plantas por hectárea, respectivamente.

Al evaluar la estabilidad de los híbridos trilineales y de las cruzas simples, se identificó que el mejor modelo para analizar la interacción genotipo x ambiente, fue el modelo AMMI en comparación a los parámetros de estabilidad.

VI. LITERATURA GENERAL CITADA

- Alberts M.J.A. 2004. A comparison of statistical methods to describe genotype x environment interaction and yield stability in multi-location maize trials. Thesis for the degree Magister Scientiae Agriculturae in the University of the Free State Bloemfontein. pp. 13-30.
- Avila, M; Arellano, J; Virgen, J; Gámez, J. 2009. H-52 híbrido de maíz para Valles Altos de la Mesa Central de México. Agricultura Técnica en México. 35 (2):237-240.
- Becker, H. C. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. Euphytica. 30: 835-840.
- Cruz M, R. 1989. Un ejemplo de la prueba exacta de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell. Fitotecnia Mexicana. 12(2): 147-155.

- Cruz M. R., Salazar G. M. 1992. Métodos alternativos en el análisis de la interacción genotipo-ambiente. Memorias Simposio Interacción Genotipo-Ambiente en genotecnia vegetal. Publicado por SOMEFI, Guadalajara, Méx. pp. 127-148.
- Eberhart S., Russell A. W. 1966. Stability parameters for comparing Varieties. *Crop Science*. 6. p. 36-40.
- Eeuwijk F. V. 2006. Genotype by Environment Interaction. Basics and Beyond. *In* Lamkey K. R., Lee M. (eds.), *Plant Breeding: The Arnel R. Hallauer. International Symposium*. 2003 México city, México. pp. 155-170.
- Espinosa C. A., Sierra M., Gómez N. 2003. Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE. *Agronomía Mesoamericana*, Vol. 14 (2): 117-121.
- Espinosa C. A., Piña R. J., Caetano de O. A., Mora V. M. 2004. Listado de variedades liberadas por el INIFAP de 1980 a 2003. Publicación Especial No. 2, INIFAP, CIRCE, CEVAMEX, Chapingo, México. 30 p.
- Espinosa C. A., Tadeo R. M., Turrent F., A., Gómez M. N., Sierra M. M., Palafox C., A., Caballero H., F., Valdivia B., R., Rodríguez, F. 2008 a. El potencial de las variedades nativas y mejoradas de maíz. *Ciencias. Revista de Difusión de la Facultad de Ciencias de la UNAM*. 92-93: 118-125.
- Espinosa C. A., Tadeo R. M., Turrent F., A., Sierra M. M., Gómez M. N., Palafox C. A., Rodríguez M., F., Caballero H. F., Valdivia B., R., Zamudio G., B. 2008 b. Las semillas insumo fundamental para avanzar hacia la suficiencia alimentaria y reserva estratégica de granos. En: *Reserva Estratégica de Alimentos: Una alternativa para el desarrollo del campo Mexicano y la Soberanía alimentaria*. Coordinadores Alfonso Ramírez Cuellar, Benito Ramírez Valverde, Beatriz A.

Cavalloti Vázquez, Carlos F. Marcof Alvarez, Alfredo Cesín Vargas. CEDRSSA-SAGARPA-CP-UACH. Pp. 77-89.

Espinosa C. A., Tadeo R. M., Sierra M. M., Turrent F., A., Valdivia B. R., Zamudio G. B. 2009. Híbridos de maíz bajo diferentes combinaciones de semilla androesteril y fértil en México. *Agronomía Mesoamericana*. 20(2): 211-216.

Espinosa A., Tadeo M., Gómez N., Sierra M., Virgen J., Palafox A., Caballero F., Vázquez G., Rodríguez F., Valdivia R. 2010 a. V-54 A, nueva variedad de maíz de grano amarillo para siembras de temporal retrasado en los Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(4): 677-680.

Espinosa-Calderón A., Tadeo-Robledo M., Meza-Guzmán L. D., Arteaga-Escamilla I., Matías-Bautista D., Valdivia-Bernal D., Sierra-Macías M., Gómez-Montiel N., Palafox-Caballero A., Zamudio-González B. 2010 b. Eliminación de espiga y hojas en un híbrido de maíz androestéril y fértil. *Universidad y Ciencia*. 26(3):215-224.

Espinosa C. A., Tadeo R. M., Zamudio G. B., Turrent F. A., Arteaga E. I., Trejo P. V., Martínez Y. B., Canales I. E., Zaragoza E. J., Sierra M. M., Gómez M. N., Valdivia B. R., Palafox C. A. 2012. Rendimiento de cruza simples de maíz en versión androestéril y fértil bajo diferentes densidades de población. *Ciencias Agrícolas Informa*, 21: 78-85.

Espinosa C. A., Tadeo R. M., Virgen V. J., Rojas M. I., Gómez M. N., Sierra M. M., Palafox C. A., Vázquez C. G., Rodríguez M. F. A., Zamudio G. B., Arteaga E. I., Canales I. E. I., Martínez Y. B., Valdivia B. R. 2012. H-51 AE híbrido de maíz para áreas de humedad residual, buen temporal y riego en Valles Altos del Centro de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35: 347-349.

- Finlay, K. W., Wilkinson G. N. 1963. The analysis of adaptation in plant breeding programme. *Austr. J. Agric. Res.* 14: 742-754.
- Ortiz-Cereceres, J; Ortega-Paczka, R; Molina-Galan, J; Mendoza-Rodríguez, M; Mendoza-Castillo, C; Castillo-González, F; Muñoz-Orozco, A; Turrent-Fernández, A; Kato-Yamakake, T A. 2007. Análisis de la Problemática de la producción nacional de maíz y propuestas de acción. Grupo Xilonen, Universidad Autónoma Chapingo- Colegio de Postgraduados-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, México. 29 p.
- Poehlman J. M., Allen S. D. 2005. *Mejoramiento Genético de las Cosechas*. Segunda edición. Editorial Limusa. México.
- Tadeo R., M., Espinosa C., A., Solano, A. M., Martínez M., R. 2001. Esterilidad masculina para producir semilla híbrida de maíz. *Revista Ciencia y desarrollo*, Número 157: 64-75.
- Tadeo R. M., Espinosa C. A., Solano A. M., Martínez M. R. 2003. Androesterilidad en líneas e híbridos de maíz de Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana*, 14 (1): 15-19.
- Tadeo R. M., Espinosa C. A., Chimal N., Arteaga E. I., Trejo P. V., Canales I. E., Sierra M. M., Valdivia B. R., Gómez M. N. O., Palafox C. A., Zamudio G. B. 2012. Densidad de población y fertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles. *Terra Latinoamericana*, 30 (2): 156-164.
- Tadeo R. M., Espinosa C. A., Trejo P. V., Arteaga E. I., Canales I. E.I., Turrent F. A., Sierra M. M., Valdivia B. R., Gómez M. N. O., Palafox C. A., Zamudio G. B. 2013. Eliminación de espiga y hojas en progenitores androestériles y fértiles de los híbridos trilineales de maíz ‘H-47’ y ‘H-49’. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36 (3): 245 – 250.

- Tadeo-Robledo M., Espinosa-Calderón A., Turrent-Fernández A., Zamudio-González B., Valdivia-Bernal R., Andrés-Meza P. 2014. Productividad de grano de cuatro híbridos trilineales de maíz en versión androesteril y fértil. *Agronomía Mesoamericana* 25(1): 45-52.
- Turrent, F A. 1994. Plan de investigación del Sistema maíz-tortilla en la región Centro. CIRCE, INIFAP, SARH, Publicación Especial Núm. 12, Chapingo, México.
- Turrent, F A. 2009. El potencial productivo del maíz. En: *Ciencias. Revista de Difusión de la Facultad de Ciencias de la UNAM.* 92-93:126-129.
- Uhart S. A., Andrade F. H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I Effects on crop growth, development, dry matter partitioning. *Crop Science.* 35: 1376-1383.