



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD**

GENÉTICA

ANDROESTERILIDAD Y CAPACIDAD DE RESTAURACIÓN DE LA FERTILIDAD MASCULINA, LA PRODUCTIVIDAD DE GRANO Y SEMILLAS EN LÍNEAS E HÍBRIDOS DE MAÍZ

ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS

T E S I S

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

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

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

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Enrique Inoscencio Canales Islas, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. J. Jesús García Zavala, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

ANDROESTERILIDAD Y CAPACIDAD DE LA RESTAURACIÓN DE LA FERTILIDAD MASCULINA, LA PRODUCTIVIDAD DE GRANO Y SEMILLAS EN LÍNEAS E HÍBRIDOS DE MAÍZ

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 22 de NOVIEMBRE de 2018



Firma del
Alumno (a)



DR. J. JESÚS GARCÍA ZAVALA
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Androesterilidad y capacidad de restauración de la fertilidad masculina, la productividad de grano y semillas en líneas e híbridos 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:

DOCTOR EN CIENCIAS

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

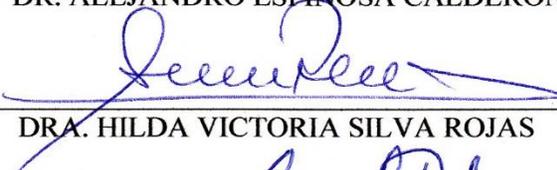
CONSEJERO


DR. J. JESÚS GARCÍA ZAVALA

DIRECTOR
DE TESIS


DR. ALEJANDRO ESPINOSA CALDERÓN

ASESORA


DRA. HILDA VICTORIA SILVA ROJAS

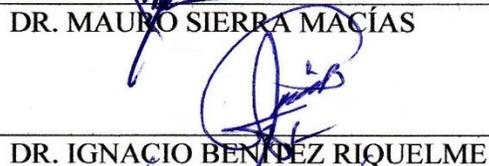
ASESOR


DR. NOEL ORLANDO GÓMEZ MONTIEL

ASESOR


DR. MAURO SIERRA MACÍAS

ASESOR


DR. IGNACIO BÉNITEZ RIQUELME

ASESOR


DR. SALVADOR MIRANDA COLÍN

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2018

**ANDROESTERILIDAD Y CAPACIDAD DE LA RESTAURACIÓN DE LA
FERTILIDAD MASCULINA, LA PRODUCTIVIDAD DE GRANO Y SEMILLAS
EN LÍNEAS E HÍBRIDOS DE MAÍZ**

ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS DR., C.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2018

RESUMEN

La disponibilidad de variedades mejoradas de maíz (*Zea mays* L.) para los Valles Altos de México por instituciones de investigación pública es limitada. Es por ello que la FESC-UNAM e INIFAP CEVAMEX trabajan en conjunto generando variedades mejoradas de maíz utilizando progenitores hembra androestériles, y progenitores macho restauradores de la fertilidad masculina. Los objetivos de la investigación fueron determinar la productividad de grano de híbridos de maíz con androesterilidad y progenitor restaurador de la fertilidad masculina en Valles Altos de México; estudiar su interacción genotipo x ambiente, su productividad, y la estabilidad del rendimiento de grano; e identificar el tipo de esterilidad citoplásmica masculina (CMS) en los progenitores androestériles de maíz de los híbridos de la UNAM e INIFAP, con ayuda de la técnica PCR, e iniciadores específicos para las fuentes de CMS C, T y S. De los genotipos evaluados en los ciclos primavera-verano 2013, 2014 y 2015, cuatro de los que utilizaron la línea macho restauradora de la fertilidad MIA44 R, en la conformación del híbrido final con las hembras fértiles o androestériles, presentaron competitividad similar estadísticamente a los híbridos comerciales, con una media general de 5789 kg ha⁻¹. El modelo AMMI y SREG identificaron a los genotipos Tsiri Puma, H-50, (IA446F X IA442F) X MIA44 R, y H-51 AE como estables y de mayor adaptación. De los genotipos evaluados en el ciclo primavera-verano 2016, los híbridos con fertilidad restaurada con mayores rendimientos fueron el CSRMXMIA46 con 10085 kg ha⁻¹, y el Atziri Puma, con 10028 kg ha⁻¹. El híbrido más estable fue el híbrido con fertilidad restaurada Tlaoli Puma 4. Se logró identificar que el 100 por ciento de los genotipos evaluados de la UNAM e INIFAP, pertenecen a la fuente de esterilidad citoplásmica masculina fuente "C" (Charrúa).

Palabras clave: *Zea mays* L., androesterilidad, estabilidad, restauración de la fertilidad masculina, fuente de androesterilidad.

**ANDROSTERILITY AND RESTORATION CAPACITY OF THE MALE
FERTILITY, PRODUCTIVITY OF GRAIN AND SEED IN LINES AND HYBRIDS
OF MAIZE**

ENRIQUE INOSCENCIO CANALES ISLAS DR., C.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2018

ABSTRACT

The availability of improved varieties of maize (*Zea mays* L.) for the High Valleys of Mexico generated by public research institutions is limited. That is why the FESC-UNAM and INIFAP CEVAMEX work together to generate improved maize varieties using androsterile female progenitors, and male restorers of male fertility. The objectives of this work were to determine the grain productivity of maize hybrids with male sterility and male fertility restorer in Mexican high valleys; study their genotype x environment interaction, their productivity, and grain yield stability; and identify the type of male cytoplasmic sterility (CMS) in the androsterile maize progenitors of the hybrids of UNAM and INIFAP, with the help of the PCR technique, and specific primers for the CMS C, T and S sources. Of the genotypes evaluated in the spring-summer 2013, 2014 and 2015 cycles, four of those who used the MIA44 R male fertility restoration line, in the final hybrid with the fertile or male sterile females, showed statistically similar competitiveness to commercial hybrids, with a general average of 5789 kg ha⁻¹. The AMMI and SREG model identified the genotypes Tsiri Puma, H-50, (IA446F X IA442F) X MIA44 R, and H-51 AE as stable and of greater adaptation. Of the genotypes evaluated in the spring-summer 2016 cycle, hybrids with restored fertility with higher yields were the CSRMXMIA46 with 10085 kg ha⁻¹, and the Atziri Puma, with 10028 kg ha⁻¹. The most stable hybrid was the hybrid with restored fertility Tlaoli Puma 4. It was possible to identify that 100 percent of the evaluated genotypes of the UNAM and INIFAP belong to the source of male cytoplasmic sterility source "C" (Charrúa).

Key words: *Zea mays* L., male sterility, stability, restoration of male fertility, source of male sterility

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México.

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

Al Colegio de Postgraduados, PREGEP-Genética, y al Personal Académico de este Postgrado, que ayudó a mi formación profesional.

A los Programas de Apoyo a Proyectos de Investigación en Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA UNAM), a cargo de la Dra. Margarita Tadeo Robledo, de la carrera de Ingeniería Agrícola. Con clave IT201215, e IT201618, de la FES Cuautitlán, UNAM, por su participación en los insumos, logística y equipo, en el transcurso de los cuatro años de duración del programa Doctoral y la investigación. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Carretera Cuautitlán - Teoloyucan, km 2.5. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. CP. 54714. AP. 25. Tel. 01 55 56231971.

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 y laboratorios para el establecimiento y seguimiento de mi trabajo de tesis.

A los miembros de mi Consejo Particular: Dr. José de Jesús García Zavala, Dr. Alejandro Espinosa Calderón, Dra. Hilda Victoria Silva Rojas, Dr. Noel Orlando Gómez Montiel, Dr. Mauro Sierra Macías, Dr. Ignacio Benítez Riquelme, y al Dr. Salvador Miranda Colín. Por sus muy valiosas enseñanzas, orientación, sugerencias, motivación, dirección, apoyo y correcciones emitidas durante la realización de esta investigación y que mejoraron este importante trabajo.

A la Dra. Hilda Victoria Silva Rojas, responsable del Laboratorio de Biotecnología y Patología de Semillas, del Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad – Producción de Semillas del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, por su apoyo en las actividades realizadas en dicho laboratorio.

A la Dra. Margarita Tadeo Robledo, por su colaboración y apoyo en el equipo y material de laboratorio proporcionado para poder realizar este trabajo de tesis.

Al Ingeniero Agrícola Israel Arteaga Escamilla, por su apoyo en todas las actividades de los diferentes ciclos de cultivo, y en la toma de datos de esta investigación.

Al Dr. Job Zaragoza Esparza, por su apoyo en todas las actividades de los diferentes ciclos de cultivo de esta investigación

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

A los trabajadores de campo del Dr. Alejandro Espinosa Calderón en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX): Rolando, Israel García, y Christian Jiménez.

DEDICATORIAS

A mis padres, Juana Islas Fernández y Rosalio Canales Castro, por su apoyo, dedicación, sacrificio y paciencia. Por enseñarme a no rendirme y continuar siempre hacia adelante, por hacer de mí quien soy, para ustedes con amor.

A mis hermanos, Armando y Monteserrat, por su apoyo incondicional día a día, sin su motivación esto no hubiera sido posible, con amor y mucho cariño.

A mis tíos, Alejandro, Miguel y Juan, por enseñarme a trabajar en todo lo que se pueda, siempre hacerlo bien.

A todos mis primos, en especial a Marisela Zúñiga Canales y a Elizabeth Islas Pérez por su apoyo en su momento, siempre estaré muy agradecido con ustedes.

A mis ahijados Héctor, Diego, Yaquelin, Guadalupe, Abigail, Antonio y Yusef. Con mucho cariño para ustedes.

A la Doctora Margarita Tadeo Robledo y al Doctor Alejandro Espinosa Calderón, por su apoyo durante estos más de diez años de pertenecer a su equipo de trabajo, por sus consejos y enseñanzas, muchas gracias.

Al Doctor Job Zaragoza Esparza por su apoyo, además de ser buen amigo.

Al Doctor J. Jesús García Zavala por sus enseñanzas día con día, por su paciencia y su valiosa amistad.

Al Ingeniero Agrícola Israel Arteaga Escamilla, siempre con la actitud de apoyo al necesitado, siempre con buen humor, y siempre disponible. Un excelente amigo.

A mis compañeras del equipo de semillas Consuelo López López, por su apoyo en los momentos difíciles, y por su amistad; Karina Yazmine Mora García, por su apoyo y amistad.

A mis compañeros de la generación 29 de la carrera de Ingeniería Agrícola de la UNAM, Sandra Mondragón, Beatriz Martínez, Nathalie Navarro, Berenice Méndez, Anabel Moreno, Lourdes Maya, Jazmín Serrano, Denys Meza, Julio Espinosa, René Valdez, Martín Flores, Fernando Calixto, Demetrio Matías, y José Salinas, por su apoyo, la convivencia, por estar en las buenas y malas, por su amistad y su tiempo. De igual manera a la compañera de la carrera de Ingeniería Agrícola, Fátima Hagg Torrijos.

A los becarios y tesisistas del equipo de semillas Arturo Chávez, Saúl Velazco, Francisco Martínez, Antonio Reyes, Karen Aguilar, Orlando Ramírez, y Jesús Macedo, espero haberlos

motivado un poquito a terminar su tesis, y espero haya servido mi apoyo con ustedes. De igual manera a Carlos Ortega.

A mis amigos de toda la vida, desde la infancia compadre Andrés Hernández, David Gómez, Daniel Muñoz, Eduardo Herrera, Gabriel Herrera, y Martín Hernández.

A mis compañeros del Colegio de Postgraduados Isrrael Vega, Braulio Torres, Jesús Guzmán, César Hernández G. y Rafael Rojas, gracias por su amistad y apoyo.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Objetivos generales	6
Hipótesis	7
CAPÍTULO I: PRODUCTIVIDAD DE HÍBRIDOS DE MAÍZ FÉRTILES Y ANDROESTÉRILES CON RESTAURACIÓN DE FERTILIDAD EN VALLES ALTOS DE MÉXICO	8
1.1 Resumen	8
1.2 Abstract	9
1.3 Introducción	9
1.4 Materiales y Métodos	12
1.5 Resultados y discusión	18
1.6 Conclusiones	25
1.7 Agradecimientos	25
1.8 Literatura citada	25
CAPÍTULO II: ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO EN HÍBRIDOS DE MAÍZ CON RESTAURACIÓN DE FERTILIDAD MASCULINA EN VALLES ALTOS	30
2.1 Resumen	30
2.2 Abstract	31
2.3 Introducción	31
2.4 Materiales y Métodos	34
2.5 Resultados y discusión	39
2.6 Conclusiones	47
2.7 Agradecimientos	48
2.8 Literatura citada	49
CAPÍTULO III: PRODUCTIVIDAD Y ESTABILIDAD DE NUEVOS HÍBRIDOS DE MAÍZ CON ESQUEMA DE ANDROESTERILIDAD Y FERTILIDAD RESTAURADA DE LA UNAM E INIFAP PARA VALLES ALTOS	53

3.1	Resumen	53
3.2	Abstract	54
3.3	Introducción	55
3.4	Materiales y Métodos	58
3.5	Resultados y Discusión	61
3.6	Conclusiones	68
3.7	Agradecimientos	69
3.8	Literatura citada	69
CAPÍTULO IV: IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE ANDROESTERILIDAD CITOPLÁSMICA EN LÍNEAS Y CRUZAS SIMPLES DE MAÍZ DE LA UNAM E INIFAP		73
4.1	Resumen	73
4.2	Abstract	74
4.3	Introducción	74
4.4	Materiales y Métodos	77
4.4.1	Material vegetal	77
4.4.2	Extracción de ADN	77
4.4.3	Amplificación mediante PCR	78
4.4.4	Electroforesis	80
4.5	Resultados y discusión	80
4.5.1	Extracción de DNA	80
4.5.2	Amplificación por PCR	80
4.6	Conclusiones	81
4.7	Agradecimientos	81
4.8	Literatura citada	82
DISCUSIÓN GENERAL		84
CONCLUSIONES GENERALES		87
LITERATURA GENERAL CITADA		89

LISTA DE CUADROS

No. de Cuadro	Título	Pág.
1.1.	Ambientes de prueba utilizados para determinar la productividad de híbridos de maíz fértiles y androestériles con restauración de fertilidad en Valles Altos de México.	13
1.2.	Genealogía y características del material genético utilizado para determinar la productividad de híbridos de maíz fértiles y androestériles con restauración de fertilidad en Valles Altos de México.	14
1.3.	Cuadros medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado para diversas variables de nueve híbridos de maíz evaluados en siete ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.	20
1.4.	Comportamiento medio de nueve híbridos de maíz Fértiles y Androestériles con restauración de la fertilidad masculina, en siete ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.	22
1.5.	Comportamiento medio de los ambientes de prueba para el rendimiento (kg ha^{-1}) y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.	24
2.1.	Material Genético, tipo de híbrido, procedencia y condición de androesterilidad de la craza simple progenitora en la evaluación de materiales para determinar la estabilidad del rendimiento. Ciclo primavera verano. 2013, 2014, 2015. CEVAMEX y FESC UNAM.	35
2.2.	Ambientes de prueba y sus características edafoclimáticas donde se evaluaron nueve genotipos de maíz androestériles y fertilidad restaurada para determinar su estabilidad de rendimiento.	36
2.3.	Análisis de varianza AMMI para rendimiento de grano de nueve híbridos evaluados en siete ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.	40
2.4.	Rendimiento medio en kg ha^{-1} , y valores de los dos primeros componentes principales para los nueve genotipos y los siete ambientes de prueba.	41
3.1.	Material genético para determinar la productividad y estabilidad de nuevos híbridos de maíz con esquema de androesterilidad y fertilidad restaurada de la UNAM e INIFAP para Valles Altos de México. Primavera-verano 2016.	59
3.2.	Cuadros medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado para diversas variables de nuevos híbridos de maíz con	62

	fertilidad restaurados evaluados en tres ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2016.	
3.3.	Comportamiento medio de los ambientes de prueba para el rendimiento (kg ha^{-1}) y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2016.	63
3.4.	Comportamiento medio de nuevos híbridos de maíz con fertilidad masculina restaurada, en tres ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2016.	64
3.5.	Análisis de varianza AMMI para rendimiento de grano de nueve híbridos evaluados en siete ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.	66
4.1.	Material genético utilizado para la identificación del tipo de androesterilidad citoplásmica en líneas y cruzas simples de maíz de la UNAM e INIFAP.	77

LISTA DE FIGURAS

No. de Figura	Título	Pág.
1.	Regiones de producción de maíz en México.	3
2.	Esquema de obtención de los híbridos trilineales con fertilidad restaurada.	16
3.	Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de nueve híbridos de maíz evaluados en siete ambientes. FESC-UNAM y CEVAMEX INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015. FU: Ambiente FESC-UNAM; CE: Ambiente CEVAMEX; CP1: componente principal 1.	43
4.	Biplot AMMI para nueve híbridos evaluados en siete ambientes. FESC-UNAM y CEVAMEX INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015. FU: Ambiente FESC-UNAM; CE: Ambiente CEVAMEX; CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2.	45
5.	Biplot GGE-SREG para nueve híbridos evaluados en siete ambientes. FESC-UNAM y CEVAMEX INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015. 1: FESC-UNAM 2013; 2: CEVAMEX 2013; 3: FESC-UNAM 2014; 4: CEVAMEX 2014; 5: FESC-UNAM 2015; 6: CEVAMEX 2015; 7: CEVAMEX 2015 Segunda fecha de siembra. CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2.	48
6.	Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de veintidós híbridos de maíz evaluados en tres ambientes. FESC-UNAM (FU) y CEVAMEX INIFAP (CE), Primavera – Verano 2016. CE1: CEVAMEX primer fecha de siembra; CE2: CEVAMEX segunda fecha de siembra; CP1: componente principal 1.	67
7.	Biplot AMMI para veintidós híbridos de maíz evaluados en tres ambientes. FESC-UNAM (FU) y CEVAMEX INIFAP (CE), Primavera – Verano 2016. CE1: CEVAMEX primer fecha de siembra; CE2: CEVAMEX segunda fecha de siembra; CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2.	68
8.	Regiones de mtDNA recombinante de los tipos CMS T, CMS C y CMS S, y los sitios de unión de los iniciadores específicos.	79
9.	Productos de PCR observados en gel de agarosa al 1.5%. Bandas correspondientes a la amplificación parcial del gen.	81

INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante a nivel mundial, debido a que es el cereal que más se cosecha en volumen a nivel mundial. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) estimó que la Producción Mundial de Maíz 2017/2018 será de 1031.86 millones de toneladas. La Producción Mundial de Maíz del año pasado fue de 1067.21 millones de toneladas. Los 1031.86 millones de toneladas estimados este año significa una disminución de 35.35 millones de toneladas o un -3.31% en la producción de maíz alrededor del mundo. Para el año agrícola 2018/2019 se espera una producción mundial de 1068.3 millones de toneladas (USDA, 2018).

En México ante la falta de seguridad alimentaria y autosuficiencia alimentaria, es necesario producir nuestros propios alimentos, en especial cultivos de granos básicos y oleaginosas, maíz, frijol, trigo, arroz, soya y de manera prioritaria, el maíz. En la actualidad se importan más de 15 millones de toneladas de grano de maíz (SIAP – SAGARPA, 2018).

De acuerdo con datos obtenidos del SIAP – SAGARPA, 2018, en el año agrícola 2017/2018, la producción de grano de maíz fue de 27 556 557 toneladas cosechadas en 7 567 017 hectáreas sembradas. La media nacional de rendimiento fue de 3.77 toneladas por hectárea. El rendimiento disminuyó a nivel nacional en un 1.8 por ciento, en comparación al año agrícola 2016/2017, mientras que la superficie sembrada disminuyó en 2.93 por ciento, en comparación al año agrícola 2016/2017.

Haciendo una suma de lo importado (15 millones de toneladas de grano de maíz), más la producción nacional (producción de grano de maíz fue de 27 556 557 toneladas cosechadas), se tuvo un total de aproximadamente 43 millones de toneladas de grano de maíz demandadas total aparente a nivel a nivel nacional, cantidad que puede ir aumentando debido al crecimiento poblacional, al cambio climático, al abandono y cambio de uso de suelo de las zonas agrícolas del país.

Los Valles Altos de México se ubican a una altitud de 2200 a 2600 metros de altura sobre el nivel del mar, el área sembrada con maíz que cuenta con condiciones de riego, humedad residual o temporal con precipitaciones pluviales favorables, es de aproximadamente 700 mil hectáreas (Turrent, 1994), de esta superficie, por lo menos 300 mil hectáreas podrían sembrarse con híbridos

de alto rendimiento, los cuales, dadas las condiciones favorables de humedad existentes, exhibirían buena adaptación y productividad. Ésta región del país tuvo una productividad en el año agrícola 2017/2018 de 4 416 487 toneladas (SIAP – SAGARPA, 2018). La media de rendimiento en los Valles Altos de México es de 2.7 toneladas por hectárea, de acuerdo con datos de los últimos dos años agrícolas evaluados (2016/2017, y 2017/2018), en los años agrícolas 2014/2015, y 2015/2016, el rendimiento medio de la zona fue de 2.5 toneladas por hectárea, ambos datos por debajo de la media de rendimiento nacional (SIAP – SAGARPA, 2018).

El bajío es una región de transición entre los 1500 y 2300 metros de altura sobre el nivel del mar, región donde puede probarse la adaptación y comportamiento de las variedades mejoradas generadas para Valles Altos; en la Figura 1 se presentan las zonas ecológicas de producción de maíz en México, en un estudio hecho por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (Donnet *et al.*, 2012), esta regionalización se hizo de acuerdo con las condiciones climáticas, geográficas, agroecológicas y socioeconómicas que influyen en la producción de maíz.

De acuerdo con el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) (SNICS – SAGARPA, 2018), se tienen registradas en el documento 1459 variedades mejoradas de maíz. De las cuales 1203 variedades pertenecen a empresas semilleras del sector privado, esta cantidad representa el 82.45 por ciento del total de las variedades que se ofertan en el mercado nacional, mientras que las restantes 256 variedades, son generadas en las diferentes instituciones de investigación pública del país, e institutos internacionales de investigación, representando el 17.55 por ciento de las variedades que se ofertan en el país, contrastando con lo mencionado por Luna *et al.* (2012), donde se considera que del total de semillas mejoradas actualmente en el mercado, aproximadamente el 95% son de las compañías Monsanto y Pioneer.

Para los Valles Altos de México se tienen registradas un total de 27 variedades o híbridos de maíz, para Ciudad de México (CDMX), así como los estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala (SNICS – SAGARPA, 2018). Lo que es una cantidad insuficiente de variedades mejoradas por las instituciones públicas para la región, considerando los estados que comprende y la superficie que se cultiva de maíz.

Dadas las circunstancias de lo antes mencionado, es de relevante importancia y urgencia generar variedades de maíz que satisfagan las necesidades de los productores de grano de las diferentes regiones agrícolas del país, y de manera particular para los Valles Altos de México. Para que lo

anterior ocurra, es necesario fortalecer estrategias de investigación, generación, desarrollo y producción y difusión de variedades para dar solución a estos problemas.

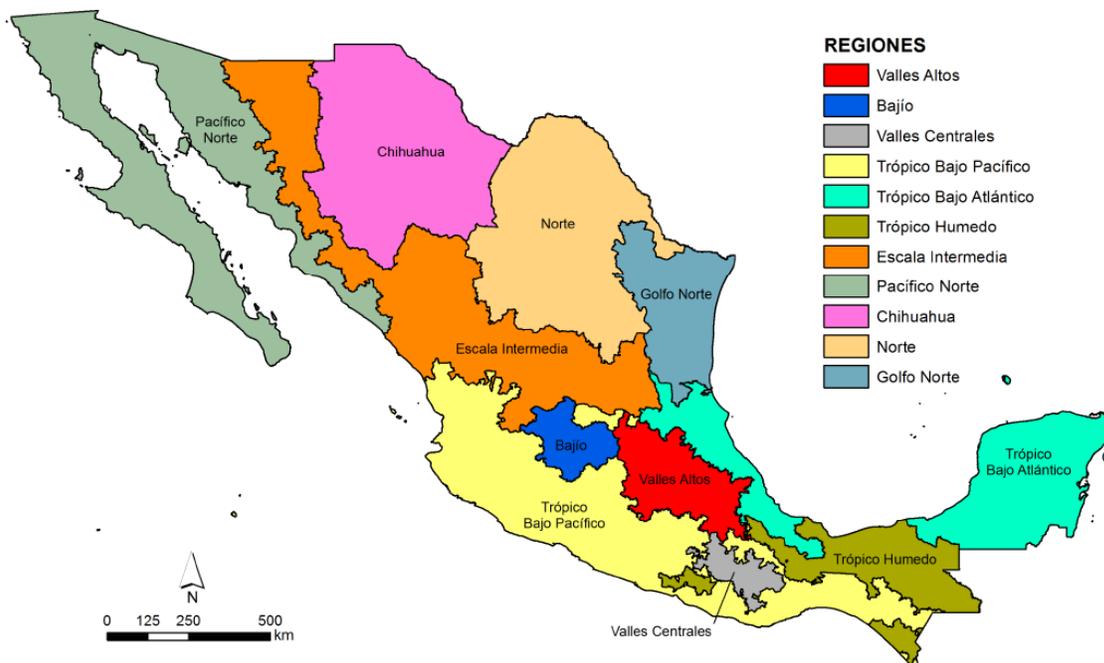


Figura 1.- Regiones de producción de maíz en México.

En la producción de semilla híbrida de maíz es necesario la eliminación de las espigas de las plantas utilizadas como progenitores hembra, con la finalidad de mantener la calidad genética de la semilla, es decir, que no se polinicen las plantas de estos progenitores con polen indeseable. El desespigue puede requerir del uso de 24 a 50 jornales por hectárea, dependiendo de la uniformidad del progenitor femenino, la presencia de hijos, y la facilidad para retirar la espiga (Tadeo *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2005). Esta actividad también se puede realizar de forma mecanizada con maquinaria especializada, aunque la limitante de su utilización es el costo elevado de la maquinaria. Ante esta dificultad, una de las alternativas para facilitar la producción de semilla híbrida es utilizar líneas de maíces con androesterilidad, incorporando esta característica en los progenitores femeninos, los cuales no producen polen, y entonces ya no es necesario desespigarlas (Martínez *et al.*, 2006; Espinosa *et al.*, 2012).

La androesterilidad puede ser aprovechada de dos formas: la primera haciendo mezclas de semilla androestéril y fértil, en diferentes proporciones, teniéndose una mayor proporción en la

mezcla de semilla androestéril que androfértil, siendo esta última el polinizador común (Espinosa *et al.*, 2009; Tadeo *et al.*, 2010). La segunda forma es utilizando la capacidad restauradora de la fertilidad de un material, donde destaca el método ABR, (Mendoza *et al.*, 2006; Cisneros *et al.*, 2012; Ba *et al.*, 2014). El procedimiento consiste en cruzar una línea A que es androestéril con una línea B, la cual es fértil pero no restauradora de la fertilidad, que se denomina línea Mantenedora. El resultado de la cruce anterior es un híbrido de cruce simple androestéril (AxB), que se cruzará como hembra con una línea R macho, denominada línea Restauradora, la cual suprime la androesterilidad y reinstala la fertilidad masculina, lo que debe evaluarse en diferentes ciclos agrícolas para confirmar que efectivamente restaure la fertilidad masculina. Al final, en la conformación del híbrido trilineal, se obtiene un genotipo completamente fértil. Esta segunda forma de aprovechar la androesterilidad se utilizó en la presente investigación.

Es así, que desde 1992 la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM), y en el Campo Experimental Valle de México, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), trabajan en conjunto realizando trabajos de mejoramiento genético para incorporar la androesterilidad génica – citoplásmica a las líneas progenitoras hembras élite de algunos de los híbridos comerciales y experimentales desarrollados por la UNAM y el INIFAP (Tadeo *et al.*, 2007; Espinosa *et al.*, 2009). Posteriormente (1995-1997), se identificaron líneas con capacidad restauradora (Tadeo *et al.*, 2003), donde se han mejorado las líneas macho progenitoras de ambos programas, en conjunto, con la finalidad de obtener híbridos con mejores rendimientos y facilidad en la producción de semilla en la formación del híbrido.

En forma ininterrumpida en los diferentes años, se continúan haciendo nuevas evaluaciones y probando diferentes combinaciones para la formación de nuevos híbridos trilineales con progenitores hembra androestériles, y progenitores macho con capacidad restauradora de la fertilidad masculina, donde se ha obtenido como resultado de la investigación híbridos experimentales de excelente potencial productivo, candidatos a registrarse en el CNVV, con la finalidad de que se puedan producir de forma comercial en los Valles Altos de México. Es importante tener claro que las variedades mejoradas que se registran en el CNVV y se protegen en los derechos de propiedad intelectual en el esquema de la Unión Internacional para la Protección

de Obtenciones Vegetales (UPOV), con Títulos de Obtentor, deben cumplir diferentes requisitos como son la distinción, homogeneidad y estabilidad.

Para medir la interacción genotipo x ambiente (IGA) existen métodos que se basan en los coeficientes de regresión (Finlay y Wikilson, 1963; Eberhart y Russell, 1966); sin embargo, estos modelos no proporcionan información sobre qué genotipos o ambientes causan dicha interacción. En años recientes se han desarrollado métodos multivariados para el análisis IGA, los cuales agrupan a los genotipos con respuestas similares y facilitan la interpretación; además, permiten analizar un mayor número de ambientes y genotipos al mismo tiempo (Holts, 2001). Bajo esta condición, en este trabajo se decidió hacer un estudio de la interacción genotipo por ambiente para definir los genotipos experimentales que presentaran mejor estabilidad a través de los ambientes de prueba en los diferentes años en que se evaluaron los híbridos, utilizando métodos multivariados como fue el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI), y el modelo de regresión en sitios (SREG).

En el año 2017, se culminó el registro en el CNVV de dos híbridos generados en la UNAM, Atziri Puma y Tlaoli Puma, híbridos experimentales que se utilizaron esta investigación en el ciclo primavera-verano 2016, ambos con restauración de la fertilidad masculina, los cuales son los primeros materiales con androesterilidad y restauración de la fertilidad generados por la investigación pública en México, que se registran ante el CNVV.

La androesterilidad de los progenitores de ambos programas de mejoramiento genético fue descubierta en 1992 en las accesiones y parcelas de la FESC-UNAM, en materiales que provienen de la raza cónico, misma que es una de las 59 razas de maíz existentes en nuestro país. Estos progenitores presentan androesterilidad génico – citoplásmica, por la presencia de genes recesivos *cms/cms* en el núcleo y en la presencia de un citoplasma estéril (mt DNA). Fue necesario identificar la fuente de androesterilidad citoplásmica, ya que es importante conocer si estos progenitores son susceptibles a *Bipolaris maydis*, que ocasionó una epifitía en gran parte de las zonas maiceras de los Estados Unidos de América. A consecuencia de este evento, la fuente CMS tipo T ha sido descartada en programas de mejoramiento. A finales de la década de los setentas y principios de la década de los ochentas del siglo pasado, se encontraron nuevas fuentes de esterilidad masculina citoplasmática (CMS), como la CMS tipo C (Charrúa) y la CMS tipo S (USDA).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en relación con las líneas de investigación, que se desarrollaron en torno a los híbridos experimentales inicialmente androestériles y luego con fertilidad restaurada, así como los estudios de la estabilidad genética del rendimiento, y la identificación de la fuente de esterilidad citoplásmica masculina de los progenitores femeninos. Además se incluye la descripción de sus características agronómicas, sus rendimientos y otros elementos que los ubican como alternativa de uso con buen potencial para los productores de maíz de los Valles Altos de México (Espinosa *et al.*, 2018; Tadeo *et al.*, 2010; Tadeo *et al.*, 2014; Tadeo *et al.*, 2016).

Se presentan diferentes trabajos relacionados con híbridos trilineales, obtenidos con progenitores hembra androestériles y progenitores macho con capacidad restauradora de la fertilidad.

OBJETIVOS GENERALES:

1. Evaluar la capacidad productiva de grano de híbridos trilineales experimentales de maíz obtenidos con esterilidad masculina y combinaciones con un progenitor que restaura la fertilidad masculina, para identificar aquellos con buen comportamiento y revisar la conveniencia de recomendar su siembra en Valles Altos de México.
2. Estudiar la Interacción Genotipo por Ambiente y la estabilidad del rendimiento de grano en híbridos de maíz obtenidos con esterilidad masculina y combinaciones con un progenitor que restaura la fertilidad masculina, mediante dos modelos multivariados (SREG, y AMMI), así como definir el modelo que mejor describa la interacción genotipo por ambiente.
3. Evaluar la productividad y la estabilidad del rendimiento de grano de nuevos híbridos de maíz con esquema de androesterilidad y fertilidad restaurada de la UNAM e INIFAP en los Valles Altos de México.
4. Identificar y determinar el tipo de esterilidad citoplásmica masculina (CMS) en los progenitores androestériles de maíz de los híbridos que se generan en la UNAM e INIFAP, con ayuda de la técnica PCR con iniciadores específicos para las fuentes de esterilidad masculina C, T y S.

HIPOTESIS:

1. Al menos un híbrido experimental iguala o supera el rendimiento y otras características agronómicas a los testigos en sus diferentes años de cultivo y en sus diferentes fechas de siembra; además, que el macho utilizado en la formación de los híbridos trilineales de maíz restaura la fertilidad en la generación F₁.
2. Los híbridos experimentales evaluados presentan estabilidad en el rendimiento de grano, y tendrán mejor estabilidad que los híbridos testigos comerciales.
3. Los iniciadores específicos para esterilidad citoplásmica masculina (CMS), con ayuda de la técnica PCR y la electroforesis ayudarán a identificarán de forma efectiva el tipo de esterilidad citoplásmica masculina de los progenitores femeninos de los híbridos de la UNAM e INIFAP, y será clasificada dentro de los grupos CMS – C, CMS – T, o CMS – S.

CAPÍTULO I. PRODUCTIVIDAD DE HÍBRIDOS DE MAÍZ FÉRTILES Y ANDROESTÉRILES CON RESTAURACIÓN DE FERTILIDAD EN VALLES ALTOS DE MÉXICO

PRODUCTIVITY OF FERTILE AND MALE STERILE MAIZE HYBRIDS WITH RESTORATION OF FERTILITY IN MEXICAN HIGH VALLEYS

Enrique I. Canales-Islas¹, Alejandro Espinosa-Calderón², J. Jesús García-Zavala^{1*}, Margarita Tadeo-Robledo³, Hilda V. Silva-Rojas⁴, Ignacio Benítez-Riquelme¹, Mauro Sierra-Macías⁵, Noel O. Gómez-Montiel⁶, Salvador Miranda-Colín¹

¹Genética y ⁴Producción de Semillas. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. 56230. Montecillo, Estado de México. ²INIFAP-CEVAMEX. Km.13.5 de la Carretera los Reyes-Textcoco, Coatlinchán, Textcoco, Estado de México, C.P. 56250. ³FESC, UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan Km. 2.5, Col. San Sebastián Xhala, Cuautitlán Izcalli, Estado de México, CP. 54714. ⁵INIFAP-COTAXTLA. Kilómetro 34.5 carretera Veracruz-Córdoba, Municipio de Medellín, Ver. ⁶INIFAP-IGUALA. 40054, A Tuxpan 10, Las Americas II, Iguala de la Independencia, Gro.

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

1.1 RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar la productividad de grano de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) con androesterilidad y progenitor restaurador de la fertilidad masculina en Valles Altos de México. Se evaluaron nueve genotipos de la UNAM e INIFAP en el ciclo Primavera-verano 2013, 2014 y 2015, en siete ambientes en dos localidades del Estado de México. Los híbridos (6) se integraron con la línea macho MIA44 R, con capacidad restauradora de la fertilidad masculina, y se compararon con tres testigos comerciales. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los datos de 21 variables se analizaron en forma factorial, considerando ambientes, bloques, genotipos y sus interacciones como fuentes de variación. Los genotipos que tuvieron los mejores rendimientos fueron los híbridos comerciales Tsíri Puma y H-50, con un rendimiento medio de 6430 y 6397 kg ha⁻¹, respectivamente. Cuatro de los genotipos que utilizaron el macho restaurador de la fertilidad MIA44 R, en la conformación del híbrido final con las hembras fértiles o androestériles, presentaron competitividad similar estadísticamente a los híbridos

comerciales, con una media general de 5789 kg ha⁻¹; estas productividades apoyarían su liberación comercial. La línea macho restauradora de la fertilidad MIA44 R aportó buena heterosis en el híbrido final, y además se confirmó su capacidad restauradora de fertilidad.

Palabras clave: *Zea mays*, androestrilidad, híbridos trilineales, rendimiento, restauración de la fertilidad masculina.

1.2 ABSTRACT

The objective of this work was to determine the productivity of grain maize (*Zea mays* L.) of hybrids with male sterility and restorer progenitor of male fertility in High Valleys of Mexico. Nine maize genotypes of the UNAM and INIFAP were evaluated in the spring-summer season of 2013, 2014 and 2015, in seven environments in two localities of the State of Mexico. Six experimental maize hybrids were integrated with the male inbred line MIA44 R, which has restorative capacity of male fertility, and compared with three commercial checks. A randomized complete block design with three replications was used. Data of 21 traits were analyzed in the factorial form, where environments, blocks, genotypes and their interactions were sources of variation. The genotypes that had the best yields were the commercial hybrids Tsiri Puma and H-50, with a mean yield of 6,430 and 6,397 kg ha⁻¹, respectively. Four hybrids that had the MIA44 R male fertility restorer line in the formation of the final hybrid with fertile females or male-sterile had competitiveness statistically similar (5789 kg ha⁻¹) to the commercial hybrids. This productivity would support their commercial release. The restoring male fertility MIA44 R inbred line provided good heterosis in the final hybrid and was confirmed its restorative capacity of fertility.

Key words: *Zea mays*, male sterility, three-way hybrids, grain yield, restoration of male fertility.

1.3 INTRODUCCIÓN

En los Valles Altos Centrales de México (2200 a 2600 metros de altitud), ubicados en los estados de México, Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Ciudad de México, se cultivan 1.5 millones de hectáreas de maíz (*Zea mays* L.), de las cuales 700 mil hectáreas se cultivan en zonas de riego y buen temporal (Turrent, 1994); de esa superficie, en el estado de México se siembran 600 mil hectáreas con maíz, de las cuales en 300 mil prevalecen condiciones de riego y buenas precipitaciones pluviales (secano), con un rendimiento medio de 3.5 ton ha⁻¹, mientras que las otras 300 mil se cultivan bajo

condiciones de secano, donde las lluvias generalmente inician en forma tardía, limitando la fecha de siembra y la productividad del cultivo por su exposición a las heladas tempranas, donde se tiene una productividad media de 1.2 t ha^{-1} (Ávila *et al.*, 2009; Espinosa *et al.*, 2010).

México importa cada año grandes volúmenes de maíz, y para satisfacer la demanda de grano en la región e incrementar su rendimiento, se tiene como alternativa generar y sembrar variedades mejoradas que tengan las características de calidad que demanden agricultores y consumidores. Entre las tecnologías de producción de grano y semillas que se han generado en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), como estrategia para favorecer el uso de semilla mejorada de híbridos, están la androesterilidad y la capacidad de restauración de la fertilidad masculina (Tadeo *et al.*, 2016).

La androesterilidad es la incapacidad que tienen las plantas para producir polen, polen viable o anteras de las estructuras reproductivas masculinas. Esta condición ha sido documentada en más de 150 especies vegetales (Mackenzie *et al.*, 1994; Schnable y Wise, 1998). En la década de los años 70 del siglo pasado, la androesterilidad dejó de usarse en la faja maicera de Estados Unidos de América a causa de la enfermedad provocada por el hongo *Bipolaris maydis* raza T, que ocasionó una epifitía en gran parte de esta región. A consecuencia de este evento, la fuente CMS tipo T ha sido descartada en programas de mejoramiento. A finales de la década de los setentas y principios de la década de los ochentas, se encontraron nuevas fuentes de esterilidad masculina citoplasmática (CMS), como la CMS tipo C (Charrúa) y la CMS tipo S (USDA) (Beckett, 1971; Laughman y Gabay-Laughman, 1983). Así mismo, se conocen más de 40 mutantes androestériles en el maíz que afectan diferentes *loci* del DNA nuclear, que se pueden encontrar en forma recesiva o dominante (Skibbe y Schnable, 2005). De estas fuentes de androesterilidad, la empresa semillera Du Pont® Pioneer® ha estado aprovechando este germoplasma para generar nuevas variedades de maíz, como es el gen mutante *Ms 44* (Shen *et al.*, 2016). La androesterilidad y la restauración de la fertilidad masculina en la producción de semilla híbrida de maíz, son una herramienta fundamental por su impacto en la agricultura, las cuales se utilizan para generar los genotipos de la UNAM e INIFAP que se utilizaron en esta investigación (androesterilidad génico-citoplásmica).

El uso de la androesterilidad y la capacidad restauradora de la fertilidad masculina en la producción de semilla híbrida de maíz evita los problemas que ocurren en la eliminación de la

panoja en los progenitores hembra, reduciendo las dificultades en esta etapa y facilitando el control de la calidad e identidad genética de los híbridos producidos, además, se tiene una reducción en los costos de producción por la labor de desespigamiento de 25 hasta 50 jornales por hectárea (Beck y Torres 2005; Poehlman 2005).

La androesterilidad puede ser aprovechada de dos formas: la primera haciendo mezclas de semilla en diferentes proporciones, teniéndose una mayor proporción en la mezcla de semilla androestéril que androfértil, siendo esta última el polinizador común (Espinosa *et al.*, 2009; Tadeo *et al.*, 2010). La segunda forma es utilizando la capacidad restauradora de la fertilidad de un material, donde destaca el método ABR, que es característico en la producción de semilla en especies como el maíz, sorgo (*Sorghum bicolor* L.), trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oryza sativa*), girasol (*Helianthus annuus*), cebolla (*Allium cepa*), entre otras (Poehlman, 2005; Mendoza *et al.*, 2006; Cisneros *et al.*, 2012; Ba *et al.*, 2014). El procedimiento consiste en cruzar una línea A que es androestéril con una línea B, la cual es fértil pero no restauradora de la fertilidad, que se denomina Mantenedora. El resultado de la cruce anterior es un híbrido de cruce simple androestéril (AxB), que se cruzará con una línea R, denominada Restauradora, la cual debe evaluarse en diferentes ciclos agrícolas para confirmar que efectivamente restaure la fertilidad masculina. Al final, en la conformación del híbrido trilineal, se obtiene un genotipo completamente fértil. Esta segunda forma de aprovechar la androesterilidad se utilizó en la presente investigación.

Además de la UNAM y el INIFAP, en México no se tienen registros publicados de otras instituciones de investigación pública o privada que trabajen o cuenten con progenitores androestériles o con capacidad restauradora de la fertilidad masculina, para la conformación de híbridos o variedades mejoradas de maíz. Respecto al uso de la androesterilidad y de la restauración de la fertilidad masculina en el cultivo de maíz, se han realizado pocos trabajos en el tema, destacando el de Tadeo *et al.* (2003), quienes mencionan que en 1995 se evaluaron combinaciones de líneas con progenitores androestériles y fértiles para encontrar genotipos con capacidad restauradora de la fertilidad masculina, y se ubicaron siete líneas que restauraron la fertilidad. En este trabajo, durante la floración de los híbridos, se efectuaron revisiones diarias para verificar si los órganos masculinos producían anteras y si a su vez estas liberaban polen, con lo cual se identificó su capacidad restauradora de la fertilidad masculina. Las líneas restauradoras se cruzaron con los híbridos androestériles, nuevamente y estas combinaciones fueron evaluadas en 1996, para

verificar la presencia o no de la fertilidad masculina de los 41 híbridos que contenían la combinación de androesterilidad con una línea restauradora, identificada así el ciclo anterior. Además, se evaluó el rendimiento de los 41 híbridos comparándolo con el de híbridos fértiles experimentales y comerciales como testigos. Finalmente, se encontraron las líneas restauradoras de la fertilidad masculina: P2-1, IA49-2, IA49-1, ETH-29-1 y ETH-29-3, las cuales contienen los genes de restauración de la fertilidad masculina en estado homocigótico, ya que generaron híbridos 100 por ciento fértiles.

En los últimos años, el equipo de trabajo la UNAM y el INIFAP que participa en la línea de investigación del uso de la androesterilidad y restauración de la fertilidad se ha dado a la tarea de encontrar nuevos progenitores macho que restauren la fertilidad masculina, usando la fuente germoplásmica con que se cuenta para formar nuevos híbridos de maíz. Es imperativo que dichos progenitores expresen buen patrón heterótico con respecto a lo deseado por el fitomejorador y que satisfagan las necesidades del productor de semilla, para que los genotipos que se generan en este importante programa de mejoramiento genético mantengan su calidad genética y tengan un uso práctico.

Es así que ante la escasez de resultados tangibles y de trabajos publicados en revistas arbitradas sobre el tema del uso de la androesterilidad y la restauración de la fertilidad masculina en la producción de semilla híbrida de maíz en México, el objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad productiva de grano de híbridos trilineales experimentales de maíz obtenidos con esterilidad masculina y combinaciones con un progenitor que restaura la fertilidad masculina, para identificar aquellos con buen comportamiento y recomendar su siembra en Valles Altos de México. Se planteó la hipótesis de que al menos un híbrido experimental igualará o superará el rendimiento y otras características de los testigos; además, que el macho utilizado en la formación de los híbridos trilineales de maíz restaura la fertilidad en la generación F₁.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano de 2013, 2014, y 2015 en dos localidades. La primera fue en el campo de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (Cuautitlán-UNAM), municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, a una altitud de 2274 msnm, donde, de acuerdo con la clasificación de Köppen

modificada por García (2004), el clima se clasifica como C (w_o) (w) b (i''), correspondiente a clima templado, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias en verano, e invierno seco; su precipitación anual promedio histórico es de 609.2 mm (García, 2004). La segunda localidad fue el predio ubicado en Santa Lucía de Prías, del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), municipio de Texcoco, Estado de México, localizado a una altitud de 2240 msnm, con un clima C (w_o) (w) b (i') g, que corresponde a clima templado con lluvias en verano, el más seco de los subhúmedos, con veranos frescos y prolongados, con temperaturas medias anuales entre 12 y 18 ° C, con una precipitación media de 625 mm (García, 2004). En cada localidad se manejó una densidad de población de 60 000 plantas por hectárea, en los diferentes ciclos de cultivo.

Los ambientes de prueba los definieron los diferentes ciclos de cultivo: 2013, 2014 y 2015 en dos localidades de siembra: FESC-UNAM y CEVAMEX. En localidad CEVAMEX, únicamente en el ciclo Primavera-Verano 2015, se estableció una segunda fecha de siembra, obteniéndose finalmente un total de siete ambientes de prueba, como se muestra en la Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Ambientes de prueba utilizados para determinar la productividad de híbridos de maíz fértiles y androestériles con restauración de fertilidad en Valles Altos de México.

AMBIENTES	LOCALIDAD	CICLO PRIMAVERA-VERANO
1	CUAUTITLÁN	2013
2	CEVAMEX	2013
3	CUAUTITLÁN	2014
4	CEVAMEX	2014
5	CUAUTITLÁN	2015
6	CEVAMEX	2015
7	CEVAMEX FS2	2015

FS2: Segunda fecha de siembra.

Se evaluaron nueve genotipos que tuvieron su origen en la UNAM e INIFAP; de ellos el H-50 (Espinosa *et al.*, 2003), H-51 AE (Espinosa *et al.*, 2012) y el Tsíri Puma (Tadeo *et al.*, 2016) son

híbridos de uso comercial y fueron usados como testigos; el resto de los genotipos son híbridos de maíz en fase experimental, los cuales se muestran en la Cuadro 1.2. La línea macho MIA44 con capacidad restauradora de la fertilidad masculina participó en la conformación de los diferentes híbridos trilineales en esta investigación, ya que se cruzó con el progenitor hembra, una cruza simple androestéril o androfértil.

Cuadro 1.2 Genealogía y características del material genético utilizado para determinar la productividad de híbridos de maíz fértiles y androestériles con restauración de fertilidad en Valles Altos de México.

GENOTIPOS	TIPO HÍBRIDO	ORIGEN	CONDICIÓN AE/F CS
(IA446F X IA442) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Fértil
(IA442AEC X IA249) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Androestéril
(IA424AEC X IA249) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Androestéril
(IA424F X IA249) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Fértil
(IA424AEC X M18) X MIA44 R	Trilineal	INIFAP/UNAM	Androestéril
(IA424F X M18) X MIA44 R	Trilineal	INIFAP/UNAM	Fértil
H 51 AE	Trilineal	INIFAP	Androestéril
TSIRI PUMA	Trilineal	UNAM	Androestéril
H 50	Doble	INIFAP	Fértil

R: Híbridos trilineales con fertilidad restaurada.

Como puede observarse, en los híbridos trilineales con fertilidad restaurada (IA442AEC X IA249) X MIA44 R, (IA424AEC X IA249) X MIA44 R y (IA424AEC X M18) X MIA44 R, siendo

la línea MIA44 R el progenitor masculino en todos los híbridos trilineales. Las líneas IA442, IA424, e IA249 se obtuvieron a partir de germoplasma del CIMMYT, manteniendo estos materiales mediante selecciones en autofecundaciones, cruzamientos planta a planta, y ciclos de avance fraternal. La línea M18 es descendiente de maíz latente (resistente a sequía) identificada por Gilberto Palacios de la Rosa en 1956, y fue progenitora de otros híbridos como H-33, H-30, H-34 y H-50. Esta línea otorga rusticidad y robustez a esos híbridos. Las líneas IA442AEC e IA424AEC fueron desarrolladas en la UNAM al incorporarles a las líneas 242F y 244F la androesterilidad tipo C, la cual fue identificada en la UNAM, y se caracteriza por su estabilidad a través de ambientes y su acción en el grupo C; la línea MIA44 R fue utilizada como progenitor masculino para cruzarse con la fuente de androesterilidad (Figura 2).

Partiendo de las líneas 242F y 244F, estas se cruzaron con una fuente androestéril y se efectuaron de seis a ocho retrocruzas hacia estas líneas para obtener sus versiones con esterilidad masculina, las cuales se denominaron IA442AEC e IA424AEC, siendo ésta una versión isogénica, cuyas líneas mantenedoras son las líneas IA442F e IA424F en su versión fértil. En resumen, la línea MIA44 R se obtuvo a través del método genealógico o de pedigrí. Al utilizar esta línea como progenitor macho, se llevó a cabo la verificación de que efectivamente esta línea restaura la fertilidad masculina en la progenie, es decir, la F₁ fue completamente fértil, y esto se verificó en diferentes ciclos de cultivo.

La producción de semilla de los híbridos trilineales se puede hacer con facilidad, pues sus progenitores coinciden en días a floración. Las cruzas simples hembras (IA442AEC X IA249), (IA424AEC X IA249) y (IA424AEC X M18), versión androestéril, se establecieron en campo en cuatro surcos, por dos de macho de la línea MIA44 R.

Para el caso de los híbridos trilineales con progenitores hembra fértiles (IA446F X IA442F) X MIA44 R, (IA424F X IA249F) X MIA44 R, y (IA424F X M18) X MIA44 R se realizó desespigamiento en la formación de la cruce simple, y al momento de formar el híbrido trilineal, se eliminó la panoja en la cruce simple hembra.

Los experimentos que se establecieron en la FESC-UNAM se manejaron bajo condiciones de secano, mientras que los experimentos que se establecieron en el CEVAMEX se manejaron con

punta de riego. Para el control de malezas se aplicó Gesaprim® (Atrazina) 2kg/ha y Hierbamina® (2-4D amina) 2L/ha.

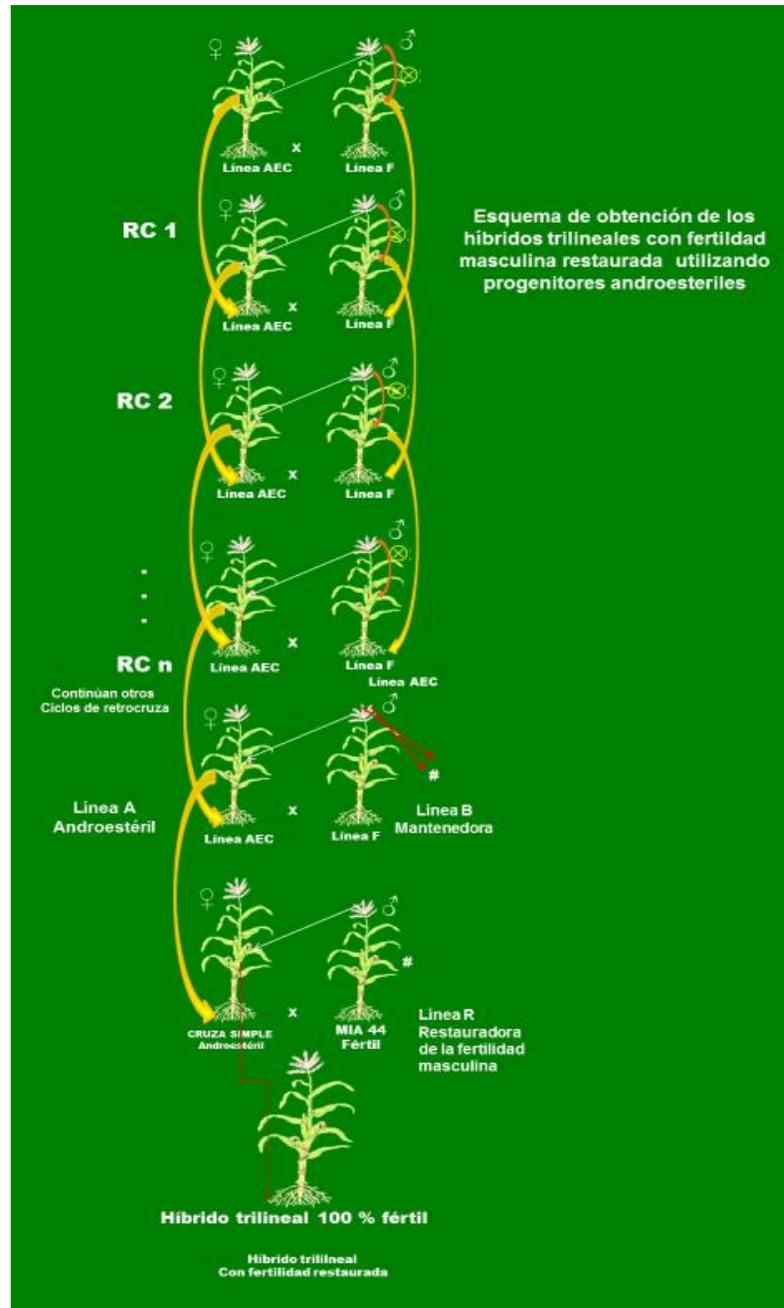


Figura 2. Esquema de obtención de los híbridos trilineales con fertilidad restaurada.

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.

En cada parcela se evaluaron 21 variables, tomándose datos de los días a floración masculina, cuando el 50 % de las plantas de la parcela liberaron polen; días a floración femenina, cuando el 50 % de las plantas en la parcela expusieron los estigmas, en por lo menos tres centímetros; además, se hicieron revisiones diariamente para verificar que la espiga de cada planta de maíz producía anteras y a su vez estas liberaban polen. También se midieron la altura de planta y altura de mazorca en cm de cinco plantas por parcela, midiéndose de la base del tallo al nudo de inserción de la espiga, y de la base del tallo al nudo de inserción de la mazorca superior, respectivamente. A la cosecha se tomaron variables como: peso de campo, uniformidad de la planta, sanidad de mazorca, cobertura de mazorca, mazorcas buenas y mazorcas malas (malas cuando éstas presentaban un daño por plagas, enfermedades o alguna anomalía en su desarrollo, en un 50 por ciento de la mazorca o más). Para determinar los componentes de rendimiento, se tomó una muestra representativa de cinco mazorcas en cada parcela, en las que se midieron las variables: longitud de mazorca, número de hileras por mazorca, número de granos por hilera, granos por mazorca, diámetro de mazorca, diámetro de olote, peso volumétrico, peso de 200 granos, porcentaje de grano, y porcentaje de humedad del grano, medido con un determinador de humedad eléctrico marca Stenlite®, para obtener el porcentaje de materia seca. La estimación del rendimiento de grano de cada genotipo se hizo mediante la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = (\text{PC} * \% \text{MS} * \% \text{G} * \text{FC}) / 8600$$

Dónde: PC: Peso de campo; %MS: Porcentaje de materia seca; %G: Porcentaje de grano; FC: Factor de conversión para obtener rendimiento por ha, se obtuvo al dividir 10000 m² / tamaño de la parcela útil en m² (4 m²); 8600: es un valor constante, que permite estimar el rendimiento con una humedad uniforme del 14 %, que es a la cual se manejan las semillas en forma comercial.

Para el análisis estadístico de los datos se aplicó un análisis combinado de los ambientes de prueba, considerando como fuentes de variación los ambientes, genotipos y la interacción Genotipo x ambiente. El análisis de varianza y la comparación de medias con la prueba de Tukey se realizaron con el programa SAS® versión 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). Se realizó un análisis de correlación de Pearson para las 21 variables evaluadas con la finalidad de determinar cuáles variables definieron mejor el rendimiento y de elegir las que tuvieran mayor significancia y representatividad en el experimento.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado detectó diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre ambientes y entre genotipos para todas las variables (Cuadro 1.3). La interacción genotipo \times ambiente resultó altamente significativa ($P \leq 0.01$) para las variables floración femenina, peso volumétrico y porcentaje de grano. El contraste ecológico entre ambientes, es decir, entre sitios, que incluye latitudes, condiciones edáficas y climáticas influyó en los genotipos para responder de manera significativa a dichos cambios ambientales, tal como lo mencionan Ávila *et al.* (2009) y Canales *et al.* (2016). La diferencia entre genotipos fue debida a que los híbridos trilineales tuvieron una base genética contrastante, principalmente entre los híbridos experimentales y los testigos. En la interacción genotipo \times ambiente hubo significancia ($P \leq 0.05$) para las variables de floración, longitud de mazorca, PH y porcentaje de grano. Sin embargo, y con base en la ausencia de interacción genotipo por ambiente, dicha respuesta al cambio de ambiente para rendimiento fue en forma paralela y consistente, lo que coincide con lo reportado en trabajos similares por Avendaño *et al.* (2009), Palemón *et al.* (2012) y Peña *et al.* (2012), resaltándose para estos materiales su proceso de adaptación en la región, su proceso de mejoramiento genético, y sus rendimientos superiores a la media nacional (2.8 ton ha⁻¹) (Ortiz *et al.*, 2007; Turrent, 2009) y del estado de México (1.2 ton ha⁻¹) (Ávila *et al.*, 2009; Espinosa *et al.*, 2010), ya que su media general de rendimiento fue de 5789 kg ha⁻¹. El coeficiente de variación del rendimiento fue de 21 %, mientras que para el resto de las variables los coeficientes de variación fueron menores al 11 %. Esto indica la confiabilidad de los datos experimentales, ya que de acuerdo con este parámetro, la desviación estándar de las mediciones resultó menos del 20 % de la media general.

La comparación de medias entre los genotipos considerando los siete ambientes de prueba (Cuadro 1.4), indicó que el mejor rendimiento correspondió al híbrido trilineal Tsíri Puma con 6430 kg ha⁻¹. Tsíri Puma fue liberado por la UNAM (Tadeo *et al.*, 2016) y sobresalió en un trabajo similar realizado por López *et al.* (2017). El rendimiento de Tsíri Puma resultó estadísticamente similar al de los híbridos H-50, (IA446FXIA442F) X MIA44 R, (IA424XIA249) X MIA44 R, (IA442AECXIA249) X MIA44 R, (IA424AECXIA249) X MIA44 R, y H-51 AE. Con respecto a los híbridos menos rendidores comparados con Tsíri Puma, (IA424FXM18) X MIA44 R rindió 16.9 % menos, pero la diferencia resultó no significativa, en contraste (IA424AECXM18) X MIA44 R rindió 24.21 % significativamente menos. Los híbridos experimentales utilizados en esta

investigación, la mayoría de ellos destacan por su potencial productivo, uniformidad que facilita la cosecha mecanizada, resistencia al acame, y la calidad genética de los progenitores y del híbrido final con el uso de la androesterilidad, abaratando esto la semilla de los mismos para el productor. El resultado anterior indica que el progenitor MIA44 R apareado con cruza simple fértiles o androestériles generó varias combinaciones sobresalientes que presentaron rendimientos similares a los que tuvieron los testigos comerciales Tsiri Puma, H 50 y H 51 AE; además, con el buen rendimiento expresado por las cruza se verificó que MIA44 R restauró la fertilidad masculina exitosamente.

Cuadro 1.3 Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado para diversas variables de nueve híbridos de maíz evaluados en siete ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.

VARIABLES										
Fuente de Variación	G L	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	FM (Días)	FF (Días)	P. H. (kg hl ⁻¹)	LM (cm)	Peso de 200 granos	GRA/HIL	D/MZ (cm)	Porcentaje de Grano
Ambientes (A)	6	51073658.4**	539.6**	605.2**	12409.5**	16.9**	5249.8**	21.1**	3.3**	33.2**
Genotipos (G)	8	7351436.5**	30.5**	24.5**	2139**	3.7**	270.4**	21.8**	0.18**	15**
Bloques A	14	4699271.5**	9.9**	5.3	356.7	1.3	89.3	3.7	0.15**	6.4
G x A	48	1888095.7	5.2*	5.5**	1044.2**	2.3*	67.1	8.1	0.06	6.6**
Error	112	1491500.9	2.8	3.1	432.9	1.4	50.7	6.1	0.04	3.6
C.V. (%)		21	2.1	2.2	2.9	8.3	10.9	8.3	4.2	2.3
Media		5789	78.7	80	72.2	14.4	65.2	29	4.8	84.6

G L: Grados de libertad; FM: Floración Masculina; FF: Floración Femenina; P. H.: Peso Hectolítrico; LM: Longitud de Mazorca; GRA/HIL: Granos por hilera; D/MZ: Diámetro de mazorca. Significancia estadística al 0.01 de probabilidad (**) y al 0.05 de probabilidad (*); C.V: Coeficiente de variación (%).

Por otro lado, en los nueve genotipos las floraciones masculina y femenina variaron de 77 a 80 días y de 78 a 81 días, respectivamente, siendo Tsiri Puma el material más precoz, con 77 y 78 días a floración masculina y femenina, respectivamente. Este resultado contrasta con el de Tadeo *et al.* (2016), quienes indican que Tsiri Puma tiene floración masculina y femenina de 85 y 86 días, respectivamente. Con base en estos resultados, puede considerarse que los genotipos evaluados en este trabajo resultaron de ciclo intermedio, lo que guarda relación con las fechas de siembra y las condiciones ambientales que prevalecieron e incidieron sobre los materiales durante su evaluación. Los genotipos (IA424FXM18) X MIA44 R y (IA442AECXIA249) X MIA44 R fueron los más tardíos con 80 y 81 días de floración masculina y femenina, respectivamente.

En cuanto al peso hectolítrico, los resultados variaron de 71.1 kg hl⁻¹ a 74.5 kg hl⁻¹, teniendo el mayor valor Tsiri Puma. En la variable granos por hilera, los valores fueron de 28 a 31 granos, destacando nuevamente Tsiri Puma junto con otros tres materiales. La longitud de mazorca resultó de 14 a 15 centímetros, sobresaliendo Tsiri Puma y dos híbridos experimentales. El peso de 200 granos varió de 59.6 a 69.7 gramos. El diámetro de mazorca varió de 4.6 a 5 centímetros. En estas dos últimas variables, los valores más altos los tuvo el híbrido H-50, pero varios materiales experimentales también tuvieron valores similares a los de éste.

Con respecto al comportamiento promedio de los siete ambientes (Cuadro 1.5), este indica que para rendimiento se formaron tres grupos de significancia, donde el ambiente de Cuautitlán 2013 produjo el mayor rendimiento, con 7340 kg ha⁻¹, lo que concuerda con resultados similares reportados por López *et al.* (2017), donde la localidad de Cuautitlán tuvo los mayores rendimientos. No obstante, en evaluaciones similares por Tadeo *et al.* (2010) y Tadeo *et al.* (2014), los mayores rendimientos se obtuvieron en el CEVAMEX, lo que contrasta con los resultados de este trabajo. Esto indica cómo el efecto del ambiente sobre la respuesta de los genotipos cambia a través de los años y de los sitios de evaluación.

Cuadro 1.4 Comportamiento medio de nueve híbridos de maíz Fértiles y Androestériles con restauración de la fertilidad masculina, en siete ambientes, para rendimiento (kg ha⁻¹), y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.

Genotipo	Rendimiento (kg ha⁻¹)	FM (Días)	FF (Días)	P. H. (kg hl⁻¹)	LM (cm)	Peso de 200 granos	GRA/HIL	D/MZ (cm)
Tsiri Puma	6430 a	77 c	78 b	74.5 a	15 a	68.9 ab	31 a	4.7 bc
H-50	6397 a	78 bc	80 ab	71.4 b	14 b	69.7 a	30 ab	5 a
(IA446FXIA442) X MIA44 R	6378 a	78 bc	80 ab	72.3 b	15 a	68.6 ab	30 ab	4.7 bc
(IA424FXIA249) X MIA44 R	6036 ab	77 c	78 b	72.3 b	14 a	62.1 bc	29 b	4.7 bc
(IA442AECXIA249) X MIA44 R	5911 ab	80 a	81 a	71.4 b	14 b	62.4 bc	29 b	4.7 bc
(IA424AECXIA249) X MIA44 R	5710 ab	79 ab	80 ab	72.3 b	15 a	64.8 abc	30 ab	4.8 b
H-51 AE	5345 ab	79 ab	80 ab	72.5 ab	15 a	67.3 ab	29 b	4.7 bc
(IA424FXM18) X MIA44 R	5259 ab	80 a	81 a	71.1 b	14 b	63.1 abc	28 b	4.7 bc
(IA424AECXM18) X MIA44 R	4874 b	79 ab	81 a	71.8 b	14 b	59.6 c	28 b	4.6 c
D.S.H. (0.05)	1192	2	2	2.3	1	6.9	2	0.2

*Medias con letras diferentes dentro de columnas son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). FM: Floración Masculina; FF: Floración Femenina; P. H.: Peso Hectolítrico; LM: Longitud de Mazorca; kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea; cm: centímetros; GRA/HIL: Granos por hilera; D/MZ: Diámetro de mazorca.

Con respecto al menor rendimiento, este se obtuvo en CEVAMEX 2015 en la segunda fecha de siembra, con 3595 kg há⁻¹. Cabe mencionar que la mayoría de los ambientes de prueba en el CEVAMEX presentaron bajos rendimientos, pues ahí el factor edáfico fue fundamental para el desarrollo del cultivo, ya que en el CEVAMEX se tienen suelos franco-arenosos que se caracterizan por ser ligeros, con poca retención de agua y deficientes en materia orgánica, propiedades que limitan la disposición de agua por la planta en el período de llenado de grano.

La floración masculina en los ambientes de prueba ocurrió entre los 75 y 85 días y la floración femenina entre los 76 y 81 días. En el ambiente del CEVAMEX 2015 en la primera y segunda fechas de siembra los genotipos fueron más precoces, con 75 y 76 días a floración masculina y femenina, respectivamente, lo cual pudo deberse a las fechas de siembra retrasadas. En cuanto al peso hectolítrico, este varió entre 69.3 kg hl⁻¹ y 76.4 kg hl⁻¹, el valor más alto siendo obtenido en CEVAMEX 2014. La longitud de mazorca tuvo valores de 13 a 15 centímetros, registrándose el valor más alto en los ambientes de Cuautitlán 2013, 2014 y 2015. El peso de 200 granos resultó entre 49.7 y 80.9 gramos, siendo mayor en el ambiente de CEVAMEX 2015. La variable granos por hilera tuvo valores de 28 a 31 granos, obteniéndose los valores más altos en el ambiente de Cuautitlán 2014. Entre ambientes, el diámetro de mazorca varió de 4.4 a 5.2 centímetros, siendo Cuautitlán 2013 y CEVAMEX 2015 los de mayor expresión. El porcentaje de grano tuvo valores de 83.3 a 86 por ciento, obteniéndose el valor más bajo en CEVAMEX 2015, mientras que el mayor valor se obtuvo en CEVAMEX 2014. Esta variación entre los promedios de ambientes confirma la alta significancia obtenida entre ambientes para todas las variables, la cual se debió a las variaciones ambientales existentes entre ellos y a sus diferentes efectos sobre los genotipos, destacándose las diferentes condiciones de suelo, clima, humedad y manejo agronómico.

Cuadro 1.5 Comportamiento medio de los ambientes de prueba para el rendimiento (kg ha^{-1}) y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.

Ambiente	Rendimiento (kg ha^{-1})	FM (Días)	FF (Días)	P. H. (kg hl^{-1})	LM (cm)	Peso de 200 granos	GRA/HIL	D/MZ (cm)	Porcentaje de Grano
Cuautitlán 2013	7340 a	79 c	79 b	71.4 b	15 a	80.7 a	30 ab	5.2 a	83.6 c
CEVAMEX 2014	6825 ab	75 e	77 c	76.4 a	14 b	68 b	29 bc	4.8 b	86 a
Cuautitlán 2015	6367 ab	85 a	87 a	72.4 b	15 a	49.7 c	29 bc	4.4 c	85.3 ab
Cuautitlán 2014	6146 b	84 b	87 a	69.3 c	15 a	73.4 b	31 a	4.9 b	84.1 bc
CEVAMEX 2015	6050 b	75 e	76 d	72.2 b	14 b	80.9 a	28 c	5.2 a	83.3 c
CEVAMEX 2013	4198 c	77 d	79 b	71.9 b	14 b	53 c	30 ab	4.4 c	85.9 a
CEVAMEX 2015 FS2	3595 c	75 e	76 d	71.5 b	13 c	50.5 c	30 ab	4.4 c	84 bc
D.M.S.H. (0.05)	998	1	1	1.7	1	5.8	2	0.2	1.6

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

FM: Floración Masculina; FF: Floración Femenina; P. H.: Peso Hectolítrico; LM: Longitud de Mazorca; kg ha^{-1} : kilogramos por hectárea; cm: centímetros; GRA/HIL: Granos por hilera; D/MZ: Diámetro de mazorca.

1.6 CONCLUSIONES

Los genotipos experimentales que utilizaron el macho restaurador de la fertilidad MIA44 R en la conformación del híbrido final (IA446FXIA442F) X MIA44 R, (IA424FXIA249) X MIA44 R, (IA442AECXIA249) X MIA44 R, y (IA424AECXIA249) X MIA44 R presentaron rendimientos similares a los de los híbridos comerciales Tsíri Puma y H-50, que rindieron 6430 y 6397 kg ha⁻¹, respectivamente. Los niveles de productividad mostrados por los híbridos experimentales apoyarían su liberación comercial por su buena competitividad en relación con los testigos. Para esta línea macho restauradora de la fertilidad (MIA44 R), se confirmó su capacidad restauradora de la fertilidad por completo en las cruzas donde participó, por lo que puede señalarse que dicha capacidad en esta línea es genéticamente estable.

1.7 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México, por su apoyo a través de la beca de estudios doctorales otorgada al primer autor, y al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación en Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA UNAM), Titulado: **“Mejoramiento genético, protección y transferencia de híbridos de maíz, utilizando el carácter restaurador de la fertilidad masculina”**, a cargo de la Dra. Margarita Tadeo Robledo, de la carrera de Ingeniería Agrícola. Con clave IT201215, de la FES Cuautitlán, UNAM, por su participación en los insumos, logística y equipo, durante esta investigación.

1.8 LITERATURA CITADA

1. Avila M., J. Arellano, J. Virgen, J. Gámez (2009) ‘H-52’, híbrido de maíz para Valles Altos de la Mesa Central de México. *Agricultura Técnica en México*. 35:237-240, <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v35n2/v35n2a12.pdf>
2. Ávila P. M. A., S. A. Rodríguez H., M. E. Vázquez B., F. Borrego E., A. J. Lozano Del R., A. López B (2009) Aptitud combinatoria y efectos recíprocos en líneas endogámicas de maíz de valles altos del centro de México. *Agricultura Técnica en México*. 35: 285-293, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60812263005>

3. Avendaño A. C. H., J. D. Molina G., E. C. Moreno P., J. Cadena I., J. F. Aguirre M., G. Rincón E (2009) Respuesta a la selección para resistencia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Interciencia*. 34: 801-807, <http://www.redalyc.org/pdf/339/33913148008.pdf>
4. Ba Q., G. Zhang, N. Niu, S. Ma, J. Wang (2014) Cytoplasmic effects on DNA methylation between male sterile lines and the maintainer in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Gene*. 549: 192-197. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2014.01.001>
5. Beck L. D. and J. L. Torres F. (2005) Desespigamiento: *In*: Producción y tecnología de semillas de maíz del INIFAP para los Valles Altos y zona de transición. C. Ortiz T., A. Espinosa C., H. S. Azpiroz R., S. Sahagún C. (Comp.). 2005. INIFAP-CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Zinacantepec, Estado de México, México. p. 44-55.
- 6.- Beckett J. B. (1971) Classification of male-sterile cytoplasm in maize (*Zea mays* L.). *Crop Science*. 11: 724-727, <http://dx.doi:10.2135/cropsci1971.0011183X001100050037x>
7. Canales I. E. I., M. Tadeo R., J. A. Mejía C., J.J. García Z., A. Espinosa C., F. Castillo G., M. Sierra M., N. O. Gómez M. (2016) Estabilidad del rendimiento de grano en híbridos trilineales androestériles de maíz para Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 17: 1815-1827, <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263149505003.pdf>
8. Cisneros L. M. E., L. E. Mendoza O., V. A. González H. (2012) Male parent effects on stigma receptivity and seed set of sorghum A-lines under chilling field temperatures. *Plant breeding*. 131: 88-93, <http://doi:10.1111/j.1439-0523.2011.01922.x>
9. Espinosa C. A., M. Tadeo R., J. Lothrop, S. Azpiroz R., C. Tut y C., Y. Salinas M. (2003) H-50, híbrido de maíz de temporal para los valles altos de México (2200 a 2600 msnm). *Agricultura Técnica en México*. 29: 89-92, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60829110>
10. Espinosa C. A., M. Tadeo R., M. Sierra M., A. Turrent F., R. Valdivia B., B. Zamudio G. (2009) Rendimiento de híbridos de maíz bajo diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en México. *Agronomía Mesoamericana*. 20: 211-216, <http://www.redalyc.org/pdf/437/43713059002.pdf>
11. Espinosa A., M. Tadeo, N. Gómez, M. Sierra, J. Virgen, A. Palafox, F. Caballero, G. Vázquez, F. Rodríguez, R. Valdivia (2010) '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: 677-680, <http://www.redalyc.org/pdf/437/43732621007.pdf>

12. Espinosa C. A., M. Tadeo R., J. Virgen V., I. Rojas M., N. Gómez M., M. Sierra M., A. Palafox C., G. Vázquez C., F. A. Rodríguez M., B. Zamudio G., I. Arteaga E., E. I. Canales I., B. Martínez Y., R. Valdivia B. (2012) 'H-51 AE', híbrido de maíz para áreas de humedad residual, buen temporal y riego en Valles Altos Centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35: 347-349, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61025121009>

13. García E. (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 246 p.

14. Laughman, J. R. and S. J. Gabay-Laughman (1983) Cytoplasmic male sterility in maize. *Annual Review of Genetics*. 17: 27-43, <https://doi.org/10.1146/annurev.ge.17.120183.000331>

15. López L. C., M. Tadeo R., A. Espinosa C., J. J. García Z., I. Benítez R., M. G. Vázquez C., J. A. Carillo S. (2017) Productividad de cruzas simples de maíz con calidad de proteína en valles altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8: 559-570, <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263150932007.pdf>

16. Mackenzie S., S. H. He, A. Lyznik (1994) The elusive plant mitochondrion as a genetic system. *Plant Physiology*. 105: 775-780, [http://DOI: https://doi.org/10.1104/pp.105.3.775](http://DOI:https://doi.org/10.1104/pp.105.3.775)

17. Mendoza, V. R., M. H. Reyes V., C. Espinosa Z., J. A. Villareal Q. (2006) Viabilidad de polen de una línea de girasol cultivado, en el girasol silvestre (*Helianthus annuus* L. SSP. *Texanus* Heiser) y en su descendencia híbrida. *Acta Botánica Mexicana*. 76: 47-57, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57407602>

18. Ortiz C. J., R. Ortega P., J. Molina G., M. Mendoza R., C. Mendoza C., F. Castillo G., A. Muñoz O., A. Turrent F., T. A. Kato Y. (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.

19. Palemón A. F., N. O. Gómez M., F. Castillo G., P. Ramírez V., J. D. Molina G., S. Miranda C. (2012) Estabilidad de cruas intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia*. 46: 133-145, <http://www.redalyc.org/pdf/302/30223121004.pdf>
20. Peña R. A., F. González C., G. Núñez H., M. Del R. Tovar G., V. A. Vidal M., J. L. Ramírez D. (2012) Heterosis y aptitud combinatoria para producción y calidad de forraje en seis poblaciones de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 3: 389-406. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265624445003>
21. Poehlman, J. M. (2005) Mejoramiento Genético de las cosechas. 2ª ed. Editorial Limusa. D. F., México. 511 p.
22. Shen B., T. Fox, J. Debruin, C. K. Haug, M. Trimmell, J. Clapp, A. Leonard, B. Li, E. Scolaro, S. Collinson, K. Glassman, M. Miller, J. Schussler, D. Dolan, L. Liu, C. Gho, M. Albertsen, D. Loussaert. (2017) A single point mutation in Ms44 results in dominant male sterility and improves nitrogen use efficiency in maize. *Plant Biotechnology Journal*. 15:942-952, <http://doi:10.1111/pbi.12689>
23. Skibbe D. S. and P. S. Schnable (2005) Male sterility in maize. *Maydica*. 50: 367-376, <https://pdfs.semanticscholar.org/f3ca/1718990284a3e59e63c70c07b744caf798fb.pdf>
24. SAS Institute Inc. 2002. Statistical Analysis System User's Guide. SAS Institute. Cary. USA. 956 p.
24. Schnable P. S. and R. P. Wise (1998) The molecular basis of cytoplasmic male sterility and fertility restoration. *Trends in plant science*. 3: 175-180, [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01235-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01235-7)
25. Tadeo R. M., A. Espinosa C., A. M. Solano, R. Martínez M. (2003) Androesterilidad en líneas e híbridos de maíz de Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana*. 14: 15-19, <http://www.redalyc.org/pdf/437/43714103.pdf>
26. Tadeo R. M., A. Espinosa C., J. Serrano R., M. Sierra M., F. Caballero H., R. Valdivia B., N. O. Gómez M., A. Palafox C., F. A. Rodríguez M., B. Zamudio G. (2010) Productividad de diferentes proporciones de semilla androestéril y fértil en dos híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1: 273-287, <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263120630001.pdf>

27. Tadeo R. M., A. Espinosa C., A. Turrent F., B. Zamudio G., R. Valdivia B., P. Andrés M. (2014) Productividad de grano de cuatro híbridos trilineales de maíz en versión androestéril y fértil. *Agronomía Mesoamericana*. 25: 45-52, <http://www.redalyc.org/pdf/437/43730495005.pdf>
28. Tadeo R. M., A. Espinosa C., J. J. García Z., R. Lobato O., N. O. Gómez M., M. Sierra M., R. Valdivia B., B. Zamudio G., B. Martínez Y., C. López L., K. Y. Mora G., E. I. Canales I., A. L. Cárdenas M., J. Zaragoza E., H. J. Alcántar L. (2016) Tsiri Puma, híbrido de maíz para valles altos con esquema de androesterilidad para producción de semillas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 39: 331-333. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61046936019>
29. Turrent, F. A. (1994) Plan de investigación del Sistema maíz-tortilla en la región Centro. CIRCE, INIFAP, SARH, Publicación Especial Núm. 12, Chapingo, México. 58 p.
30. 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. <http://www.revistaciencias.unam.mx/es/41-revistas/revista-ciencias-92-93/220-el-potencial-productivo-del-maiz.html>

CAPÍTULO II. ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO EN HÍBRIDOS DE MAÍZ CON RESTAURACIÓN DE FERTILIDAD MASCULINA EN VALLES ALTOS

Canales Islas Enrique Inoscencio¹, Espinosa Calderón Alejandro², García Zavala J. Jesús^{1*}, Tadeo Robledo Margarita³, Silva Rojas Hilda Victoria¹, Benítez Riquelme Ignacio¹, Gómez Montiel Noel Orlando⁴, Sierra Macías Mauro⁵, Miranda Colín Salvador¹

2.1 RESUMEN

La hibridación en maíz (*Zea mays* L.) es importante para incrementar el rendimiento de grano. En el Programa de Mejoramiento Genético de la FESC UNAM se identificó la línea MIA44R de la raza Cónico, con capacidad restauradora de la fertilidad en progenitores con androesterilidad. MIA44R se usó como macho para formar seis híbridos trilineales androestériles y fértiles que fueron evaluados con tres testigos comerciales (Tsiri Puma, H 50, H 51 AE), con el objetivo de estudiar su interacción genotipo x ambiente, su productividad, y la estabilidad del rendimiento de grano. Los nueve genotipos se evaluaron en siete ambientes, definidos por localidad, ciclo de cultivo y fecha de siembra, en el ciclo Primavera-Verano de 2013, 2014 y 2015 en las localidades de Cuautitlán Izcalli y Texcoco de Mora, Estado de México. Se utilizaron los modelos multivariados SREG y AMMI. El análisis de varianza del modelo AMMI detectó alta significancia entre Genotipos y entre Ambientes para rendimiento, cuya media fue de 5798 kg ha⁻¹. De acuerdo con los valores del CP1 en AMMI, los genotipos con mayor interacción GE negativa fueron (IA446F X IA442F) X MIA44 R y (IA424AEC X IA249) X MIA44 R; y los que tuvieron mayor estabilidad y rendimiento fueron (IA424AEC X M18) X MIA44 R y el H-51 AE. El modelo Biplot GGE-SREG identificó a los genotipos Tsiri Puma, H-50, (IA446F X IA442F) X MIA44 R, y H-51 AE como estables y de mayor adaptación en los ambientes de prueba.

¹Genética y Producción de Semillas. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (enrique1784@yahoo.com.mx; zavala@colpos.mx; hsilva@colpos.mx; riquelme@colpos.mx; smiranda@colpos.mx).

²Campo Experimental Valle de México. INIFAP. Km 13.5 Carretera Los Reyes-Texcoco. 56250, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. (espinoale@yahoo.com.mx).

³Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan, Km 2.5. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. (tadeorobledo@yahoo.com).

⁴Campo Experimental Iguala. INIFAP. Km 2.5 Carretera Iguala – Tuxpan. 40000. Iguala, Guerrero. (noelorando19@hotmail.com).

⁵Campo Experimental Cotaxtla. INIFAP. Kilómetro 34.5 carretera Veracruz-Córdoba, Municipio de Medellín, Ver. (mauro_s55@hotmail.com).

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

Palabras clave: AMMI, estabilidad, híbridos trilineales, rendimiento, SREG, *Zea mays*.

STABILITY OF PERFORMANCE IN MAIZE HYBRIDS WITH RESTORATION OF MALE FERTILITY IN HIGH VALLEYS

2.2 ABSTRACT

Hybridization in maize (*Zea mays* L.) is important to increase grain yield. In the Plant breeding program of the FESC UNAM, the MIA44R inbred line of the Cónico race was identified with the capacity to restore fertility as parental with male sterility. MIA44R was used as a male to form six three-way andro-sterile and fertile hybrids that were evaluated in comparison to three commercial checks (Tsiri Puma, H 50 and H 51 AE). The objective was to study their genotype x environment interaction, their productivity, and the stability of the grain yield. The nine genotypes were evaluated in seven environments, defined by location, crop maturity and date of sowing, in the Spring-Summer season of 2013, 2014 and 2015 in the locations of Cuautitlán Izcalli and Texcoco de Mora, State of Mexico. The SREG and AMMI multivariate models were used. The analysis of variance of the AMMI model detected high significance between Genotypes and between Environments for grain yield, whose mean was 5,798 kg ha⁻¹. According to the CP1 values in AMMI, the genotypes with the highest negative GE interaction were (IA446F x IA442F) x MIA44 R and (IA424AEC x IA249) x MIA44 R; and those that had greater stability and good performance were (IA424AEC x M18) x MIA44 R and H-51 AE. The Biplot GGE-SREG model identified the genotypes Tsiri Puma, H-50, (IA446F x IA442F) x MIA44 R, and H-51 AE as stables and more adaptable in the test environments.

Key words: *Zea mays* L., AMMI, stability, three-way hybrids, yield, SREG,.

2.3 INTRODUCCIÓN

La posición comercial de semilla de variedades mejoradas de maíz (*Zea mays* L.) en México por parte de las instituciones de investigación pública es limitada, considerando que las empresas semilleras del sector privado controlan 82.5 % del total de la semilla de las variedades que se ofertan en el mercado nacional, mientras que el restante 17.5 % de semilla de las variedades, son generadas en las diferentes instituciones de investigación pública del país e institutos

internacionales de investigación, de acuerdo con cifras obtenidas del Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) (SNICS – SAGARPA, 2018).

Para los Valles Altos de México se tienen registradas 27 variedades en el CNVV (SNICS – SAGARPA, 2018), un número limitado de variedades considerando que esta zona ecológica comprende los estados de Hidalgo, Estado de México, Puebla, Tlaxcala y Ciudad de México, donde se encuentran 1.5 millones de ha en altitudes de 2200 a 2600 m, de las cuales 800 mil ha se cultivan en condiciones limitantes de secano, con lluvias tardías que limitan la fecha de siembra, y la productividad del cultivo y su exposición a la incidencia de heladas tempranas y granizadas (Ávila *et al.*, 2009). Es pues necesario generar más variedades de maíz para que el agricultor pueda escoger la que más se ajuste a las sus condiciones ambientales y económicas, y se pueda satisfacer la demanda de grano en la región. Por ello, las instituciones de investigación pública deben generar variedades de maíz de menor costo que las que ofertan las empresas semilleras particulares.

Una etapa importante en la generación de variedades e híbridos baratos de maíz es la evaluación del rendimiento de grano de materiales experimentales en diferentes ambientes de prueba. Los híbridos trilineales de este trabajo, generados en conjunto por la UNAM e INIFAP, se identifican porque tienen progenitores femeninos androestériles y progenitores masculinos que restauran la fertilidad masculina (Tadeo *et al.*, 2016; Tadeo *et al.*, 2014), condiciones ampliamente utilizadas en la hibridación para la producción de semilla mejorada (Schnable y Wise, 1998).

Con la finalidad de que una variedad mejorada cumpla con los niveles de calidad establecidos por las reglas técnicas, es necesario garantizar la identidad de las variedades cuya semilla se pretende calificar. Las condiciones que debe cumplir una variedad mejorada, la cual es sometida a proceso de registro en el Catálogo Nacional de Variedades Mejoradas son: Distinción, Homogeneidad, y Estabilidad (SNICS – SAGARPA, 2018).

El fitomejorador debe identificar los híbridos trilineales sobresalientes por la estabilidad de su rendimiento y su adaptación, evaluando estas propiedades en multi-ambientes para recomendar su uso de manera comercial (Cossa *et al.*, 2006). Becker (1981) y Becker y Leon (1988) indican que un genotipo estable posee un rendimiento que no cambia, independientemente de cualquier variación de las condiciones ambientales en las que se desarrolle el individuo. Este genotipo estable no muestra ninguna desviación del nivel esperado del carácter, lo que significa que su variación

entre los ambientes es cero. Por su parte, la adaptación en sentido amplio se refiere al mejor comportamiento relativo de un genotipo en la mayoría de los ambientes de prueba; la adaptación en sentido específico la muestra el genotipo con mejor comportamiento relativo en un determinado ambiente de prueba (Cooper, 1999; Fuentes *et al.*, 2005).

El estudio preciso de la interacción genotipo x ambiente (GE) permite definir genotipos estables o adaptados en los ambientes de prueba en función del rendimiento. La identificación de genotipos estables y superiores en estudios de campo es un desafío para los fitomejoradores por la presencia de alta interacción GE, y es que el rendimiento no se puede predecir e interpretar basándose sólo en los genotipos y en las medias ambientales (Edbon y Gauch, 2002).

Existen varios modelos para interpretar la interacción GE, entre ellos el modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa), el cual es una herramienta efectiva cuando no se cumple el supuesto de linealidad de la respuesta del genotipo a un cambio en el ambiente, y que generalmente separa la interacción GE de los componentes multiplicativos en los efectos principales aditivos mediante análisis de componentes principales (Allard y Bradshaw, 1964; Zobel *et al.*, 1988; Yan y Hunt, 1998). Los principales propósitos del análisis AMMI en los ensayos de rendimiento son: (i) estudiar la interacción genotipo x ambiente, incluir la delimitación de ambientes y seleccionar genotipos para explotar las adaptaciones en sentido específico; y (ii) aumentar la precisión en la interpretación de resultados, obtener la repetibilidad de las pruebas, permitir la selección de los mejores genotipos, y explicar ganancias genéticas (Gauch, 2013).

Otro método de análisis de la GE es el modelo GGE biplot, que se utiliza para el análisis de mega-ambientes (Samonte *et al.*, 2005; Yan y Tinker, 2005), la evaluación del genotipo (Malvar *et al.*, 2005), y la evaluación del ambiente de prueba (Blanche y Myers, 2006). Estos aspectos hacen del GGE biplot una herramienta popular completa en la genética cuantitativa y el fitomejoramiento. Recientemente, el GGE biplot basado en el modelo de regresión en sitios (SREG) ha sido útil para realizar fitomejoramiento, evaluando cómo los ambientes discriminan a los genotipos y qué tan bien un ambiente representa otros ambientes en el análisis, que determinan el rendimiento medio y la estabilidad (Yan y Kang, 2003; Crossa *et al.*, 2004; Yan y Tinker, 2006).

Considerando lo anterior, y para identificar híbridos trilineales sobresalientes por la estabilidad de su rendimiento y su adaptación, el objetivo de esta investigación fue estudiar la Interacción

Genotipo por Ambiente y la estabilidad del rendimiento de grano en híbridos de maíz obtenidos con esterilidad masculina y combinaciones con un progenitor que restaura la fertilidad masculina, mediante dos modelos multivariados (SREG, y AMMI), así como definir el modelo que mejor describa la interacción genotipo por ambiente.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron nueve genotipos que tuvieron su origen en la UNAM e INIFAP; de ellos H-50 (Espinosa *et al.*, 2003), H-51 AE (Espinosa *et al.*, 2012) y Tsíri Puma (Tadeo *et al.*, 2016) son híbridos de uso comercial y fueron usados como testigos; el primero es un híbrido de cruce doble y los otros dos son trilineales; el resto de los genotipos son híbridos de maíz en fase experimental (Cuadro 2.1). La línea macho MIA44R con capacidad restauradora de la fertilidad masculina, participó en la conformación de diferentes híbridos trilineales en esta investigación, ya que se cruzó con el progenitor hembra cruce simple androestéril o androfértil.

Cuadro 2.1 Material Genético, tipo de híbrido, procedencia y condición de androesterilidad de la cruce simple progenitora en la evaluación de materiales para determinar la estabilidad del rendimiento. Ciclo primavera verano. 2013, 2014, 2015. CEVAMEX y FESC UNAM.

GENOTIPOS	TIPO	ORIGEN	CONDICIÓN
	HÍBRIDO		CS AE/F
(IA446F X IA442) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Fértil
(IA442AEC X IA249) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Androestéril
(IA424AEC X IA249) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Androestéril
(IA424F X IA249) X MIA44 R	Trilineal	UNAM/INIFAP	Fértil
(IA424AEC X M18) X MIA44 R	Trilineal	INIFAP/UNAM	Androestéril
(IA424F X M18) X MIA44 R	Trilineal	INIFAP/UNAM	Fértil
H 51 AE	Trilineal	INIFAP	Androestéril
TSIRI PUMA	Trilineal	UNAM	Androestéril
H 50	Doble	INIFAP	Fértil

R: Híbridos trilineales con fertilidad restaurada; AE: Androestéril; F: Fértil; CS: Cruza simple.

Los ambientes de prueba los definieron los diferentes ciclos de cultivo: 2013, 2014 y 2015 en dos localidades de siembra: FES Cuautitlán UNAM (FESC-UNAM) y CEVAMEX. En la localidad CEVAMEX, en el ciclo Primavera-Verano 2015, se estableció una segunda fecha de siembra, obteniéndose finalmente un total de siete ambientes de prueba (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Ambientes de prueba y sus características edafoclimáticas donde se evaluaron nueve genotipos de maíz androestériles y fertilidad restaurada para determinar su estabilidad de rendimiento.

Ambiente	Localidad	Ciclo P-V	Textura del suelo	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)
1	FESC-UNAM	2013	Arcillosa	2274	722.5	16
2	CEVAMEX	2013	Arenoso	2240	610.6	18.8
3	FESC-UNAM	2014	Arcillosa	2274	944.6	15.9
4	CEVAMEX	2014	Arenoso	2240	879.6	18.5
5	FESC-UNAM	2015	Arcillosa	2274	1066.1	16
6	CEVAMEX	2015	Arenoso	2240	770.1	19.2
7	CEVAMEX FS2	2015	Arenoso	2240	770.1	19.2

P-V: primavera-verano; msnm: metros sobre el nivel medio del mar; mm: milímetros; °C: grados centígrados; FS2: Segunda fecha de siembra.

En cada ambiente, los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, donde la unidad experimental fue de un surco de 5 m de longitud y 0.80 m entre surcos, con una densidad de población de 60 000 plantas por hectárea⁻¹.

Los experimentos que se establecieron en la FESC-UNAM se manejaron bajo condiciones de secano, mientras que en el CEVAMEX se manejaron con punta de riego. Para el control de malezas se aplicó Gesaprim[®] (Atrazina) 2 kg/ha y Hierbamina[®] (2-4D amina) 2 L/ha.

En todas las unidades experimentales se estimó el rendimiento de grano utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \frac{P. C.* \% M. S.* \% G.* F. C.}{8600}$$

Donde:

P. C.: Peso de campo de la totalidad de las mazorcas cosechadas de cada parcela expresado en kilogramos; % M. S. = Porcentaje de materia seca, obtenidos de la muestra del grano de 5 mazorcas cosechadas; % G. = Porcentaje de grano, se obtiene del cociente del peso de la muestra de cinco mazorcas sin olote y el peso de la muestra de las 5 mazorcas con olote multiplicado por cien; F. C. = Factor de conversión con el que se obtuvo rendimiento por hectárea, al dividir 10 000 m² / el tamaño de la parcela útil en m² (4 m²); 8600 = Es una constante para estimar el rendimiento con una humedad comercial del 14 %; El resultado obtenido se expresa en kg ha⁻¹.

El análisis de estabilidad del rendimiento de grano se realizó mediante el estudio de los ambientes, los genotipos y la interacción genotipo × ambiente (GE), siguiendo el procedimiento del método AMMI y del método SREG.

El modelo **de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI)** modela la respuesta de los ambientes, los genotipos y la IGA. Se implementó con 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} = error.

Se realizó el análisis de varianza convencional para determinar los efectos de genotipos, de ambientes, y de sus interacciones, mientras que el residual no aditivo (interacción) fue analizado en la parte multiplicativa del modelo mediante el análisis de componentes principales (ACP). Se consideraron los dos primeros componentes principales para la explicación de la interacción genotipo x ambiente. La significancia de los componentes principales se definió por la prueba de Gollob (1968). La representación gráfica se obtuvo mediante los Biplots AMMI1 y AMMI2 (Zobel

et al., 1988; Yan *et al.*, 2000), donde la mayor parte de la variación debería estar expresada en los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2), ya que el biplot es la representación gráfica en dos ejes del comportamiento de una variedad en un ambiente particular (Kempton, 1984).

En el modelo de regresión de sitios (SREG) los términos lineales de genotipos no se consideran individualmente, adicionándose al término multiplicativo de la interacción GE. El SREG es útil para la formación de mega-ambientes y la agrupación de ambientes con interacción no opuesta, es decir, ordenamiento sin cambio de genotipos en ambientes que conforman un grupo (Cornelius y Crossa, 1999). Además, permite la representación simultánea de la variabilidad de genotipos y ambientes, basada en el análisis de componentes principales (Yan *et al.*, 2000). En el procedimiento de biplot GGE (Glaser, 2010; 2012) en SAS® (SAS Institute Inc., 2002) para graficar biplots GGE, la variación fenotípica observada de los genotipos en todos los ambientes está compuesta por la variación ambiental, la variación de genotipo y la interacción GE (Yan *et al.*, 2007). La definición matemática del modelo SREG es:

$$\bar{Y}_{ij} = \mu + \delta_j + \sum_{k=1}^t \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + \bar{\varepsilon}_{ij}.$$

Donde: \bar{Y}_{ij} = es la media del i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente; μ = es la media general; δ_j = es el efecto del ambiente; λ_k ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_t$) son constantes que se van incrementando (valores singulares) que siguen la imposición de restricciones de ortonormalidad en los vectores de cada uno de los genotipos, $\alpha^{ik} = (\alpha^{1k}, \dots, \alpha^{gk})$ y ambientes, $\gamma_{jk} = (\gamma_{jk}, \dots, \gamma_{ek})$, tal como $\sum_i \alpha_{ik}^2 = \sum_j \gamma_{jk}^2 = 1$, y $\sum_i \alpha_{ik} \alpha_{ik'} = \sum_j \gamma_{jk} \gamma_{jk'} = 0$, para $k \neq k'$; α_{ik} and γ_{jk} para $k = 1, 2, 3, \dots$ son llamados “primarios”, “secundarios”, “terciarios”, etc., efectos de genotipos y ambientes, respectivamente; $\bar{\varepsilon}_{ij}$ = es el residual de error, asumiendo que es cero ($0, \sigma^2/r$) (donde σ^2 es la varianza del error conjunto y r es el número de repeticiones. Los cuadrados mínimos de los parámetros multiplicativos (bilineales) en el término k se obtuvieron como el componente k de las desviaciones de la parte aditiva (lineal) del modelo (Yan *et al.*, 2007). Se trazó el diagrama de dispersión con polígono y mega-ambientes y la gráfica de comparación de genotipos (Yan y Tinkler, 2006).

Los procedimientos y análisis estadísticos se realizaron con ayuda del programa SAS® versión 9.1 (SAS Institute Inc., 2002).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza del modelo AMMI para rendimiento de grano detectó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre ambientes y entre genotipos, mientras que la interacción genotipo x ambiente no tuvo significancia estadística (Cuadro 2.3). El coeficiente de variación fue de 23.4 %, un valor aceptable por las condiciones en que se condujo la investigación. La diferencia entre ambientes para rendimiento se debió a las diferentes condiciones climáticas, hídricas, y edáficas de cada localidad donde se establecieron los experimentos. La alta significancia entre genotipos es debida a la diferente conformación genética de los híbridos trilineales experimentales y testigos comerciales. La ausencia de significancia en la interacción genotipo x ambiente (GE) indica que estadísticamente no hubo una respuesta diferencial del rendimiento de los genotipos a través de los diferentes ambientes de prueba.

La aportación total a la suma de cuadrados por parte del factor ambiental fue de 43.5 %, los efectos genotípicos aportaron 8.9 %, y la interacción GE contribuyó con 13.5 % de la variación total. Resultados similares por los altos porcentajes de los factores ambientales, y los bajos porcentajes en los factores genéticos y de interacción GE se consideran consistentes con lo reportado por Badu-Apraku *et al.* (2003), Sabaghnia *et al.* (2008), Mohammadi *et al.* (2009), Ramburan *et al.*, (2011), Shim *et al.* (2015), y Vélez-Torres *et al.* (2018). Sin embargo, en esta investigación, la contribución de la interacción GE en el porcentaje de la suma de cuadrados fue inferior a lo que han informado otros investigadores (Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012).

El modelo AMMI realiza una descomposición de la interacción GE en los componentes principales que sean necesarios, según las condiciones de cada estudio. Dentro de la interacción, de acuerdo con la prueba de Gollob (1968), los efectos del componente principal uno (CP1) resultaron altamente significativos ($P \leq 0.01$). Este componente principal explicó el 59 % de la variación total de la interacción GE, mientras que en el segundo componente principal (CP2) no hubo significancia y explicó el 24.3 %, aportando en conjunto los dos primeros componentes principales un total de 83.3 % para la explicación de la interacción GE, siendo esta mayor del 60 %, se determina que la aplicación del modelo AMMI fue efectivo (Zobel *et al.*, 1988).

Cuadro 2.3 Análisis de varianza AMMI para rendimiento de grano de nueve híbridos evaluados en siete ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015.

Fuente de Variación	GL	SC	CM	% SC
Bloques(Ambientes)	14	65282589.8	4663042.1	0.7 [†]
Ambientes	6	298556210.8	49759368.5 **	43.5 [†]
Genotipos	8	61139334.1	7642416.8**	8.9 [†]
Interacción GE	48	92299547.4	1922907.2	13.5 [†]
CP1	13	54422096.6	4186315.1 **	59 ^{††}
CP2	11	22400165.8	2036378.7	24.3 ^{††}
CP3	9	6866469.9	762941.1	7.4 ^{††}
Error	124	169039244	1509279	24.6 [†]
Total	188	686316926.1		
CV (%)	23.4			
Promedio	5 798.3	kg ha ⁻¹		

GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; % SC: porcentaje de la suma de cuadrados; CPI: componente principal 1; CP2: componente principal 2; CP3: componente principal 3; CV: coeficiente de variación; kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea; †: respecto de la SC del total; ††: respecto de la SC de la interacción genotipo × ambiente; *: P ≤ 0.05; **: P ≤ 0.01.

En el Cuadro 2.4 se presentan los valores medios de rendimiento para los genotipos y de los ambientes de prueba, además de las coordenadas del CP1 y el CP2. La variación de los valores del CP1 fueron de -5.7 a 43.2, mientras que para el CP2 la variación fue de -4 a 28.2. El genotipo que presentó los valores más bajos en el CPI y CP2 fue el híbrido trilineal con fertilidad restaurada (IA424AEC X IA249) X MIA44 R, con -5.7 y -4.0, respectivamente. El ambiente que tuvo el

mayor valor en el CP1 fue el de CEVAMEX 2014, con 50.1; en el CP2 el ambiente con mayor valor fue el de CEVAMEX 2015 en la segunda fecha de siembra.

Cuadro 2.4 Rendimiento medio en kg ha⁻¹, y valores de los dos primeros componentes principales para los nueve genotipos y los siete ambientes de prueba.

Genotipo	Media kg ha⁻¹	CP1	CP2	Ambiente	Media kg ha⁻¹	CP1	CP2
(IA446F X IA442F) X MIA44 R	6378	43.2	-24.6	FU 13	7340	-21.5	-19.3
TSÍRI PUMA	6462	15.7	16.2	CE 13	4198	-13.6	0.75
H-50	6451	17.2	28.2	FU 14	6146	22.6	14.1
(IA442AEC X IA249) X MIA44 R	5911	-24.4	-26.0	CE 14	6825	50.1	-3.9
(IA424AEC X IA249) X MIA44 R	5710	-25.2	8.1	FU 15	6367	-4.8	-17.2
(IA424F X IA249) X MIA44 R	6036	-15.8	-8.5	CE 15	6050	-12.9	-14.8
(IA424AEC X M18) X MIA44 R	4874	-5.7	-4.0	CE 15 FS2	3663	-19	40.4
(IA424F X M18) X MIA44 R	5102	-15.2	14.8				
H-51 AE	5259	10.2	-4.1				
MEDIA GENERAL	5798						

CPI: componente principal 1; CP2: componente principal 2; kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea; FU: FESC-UNAM; CE: CEVAMEX; 13: ciclo primavera-verano 2013; 14: ciclo primavera-verano 2014; ciclo primavera-verano 2015; FS2: segunda fecha de siembra.

En la Figura 3 se presenta el biplot AMMI1, el cual está diseñado considerando los efectos principales (valores de las medias de genotipos y ambientes) en la abscisa, y el efecto de interacción (estabilidad), los valores del CP1, en la ordenada (Zobel *et al.*, 1988; Yang *et al.*, 2001). Los genotipos que tuvieron valores absolutos bajos en el CP1, de baja interacción con el ambiente fueron el (IA424AEC X M18) X MIA44 R, con -5.7, H-51 AE con 10.2, y (IA424F X M18) X MIA44 R con -15.2, que presentaron valores del CP1 más cercanos a cero y tuvieron ligeros efectos de interacción, por lo que se consideraron los más estables a través de ambientes (Zobel *et al.*, 1988, Medina *et al.*, 2002; Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012).

El híbrido con mejor rendimiento fue el testigo comercial Tsíri Puma de la UNAM con 6462 kg ha⁻¹, seguido del H-50 con 6451 kg ha⁻¹, y el (IA446F X IA442F) X MIA44 R con 6378 kg ha⁻¹, y fueron los más alejados de la media general en el análisis. En la Figura 1, se pudo identificar que el híbrido trinileal (IA446F X IA442F) X MIA44 R se encuentra más alejado del eje de las ordenadas, su valor de CP1 fue de 43.2, e interacciona de forma negativa con el ambiente. El mismo caso ocurrió con los híbridos trilineales con fertilidad restaurada (IA442AEC X IA249) X MIA44 R y (IA424AEC X IA249) X MIA44 R, con -25.2 y -24.4, respectivamente. Sus medias de rendimiento a través de ambientes fueron inferiores a la media general de esta investigación.

Los ambientes con mejor comportamiento, considerando sus valores absolutos del CP1, fueron FESC-UNAM 2015 con -4.8, y CEVAMEX 2013 con -13.6. El ambiente con el mejor rendimiento fue FESC-UNAM 2013 con 7340 kg ha⁻¹, seguido por CEVAMEX 2014 con 6825 kg ha⁻¹, y FESC-UNAM 2015 con 6367 kg ha⁻¹. Los rendimientos más bajos se presentaron en CEVAMEX 2015 en la segunda fecha de siembra con 3663 kg ha⁻¹ y en CEVAMEX 2013 con 4198 kg ha⁻¹. El bajo rendimiento en CEVAMEX 2015 pudo deberse a que se sembró en una fecha tardía, afectando esto el llenado de grano en las mazorcas. Las mejores condiciones edáficas ocurrieron en el ambiente de la FESC-UNAM, en comparación con el CEVAMEX. En el ciclo agrícola primavera verano 2014, el mejor rendimiento lo produjo CEVAMEX. Al respecto, los resultados obtenidos por Kang (1993) y Vélez-Torres *et al.* (2018) coinciden con los de esta investigación, y señalan que los genotipos evaluados en diferentes localidades o años frecuentemente tienen fluctuaciones en rendimiento debido a la respuesta del genotipo a efectos ambientales, como la fertilidad del suelo o la presencia de estreses ambientales bióticos y abióticos.

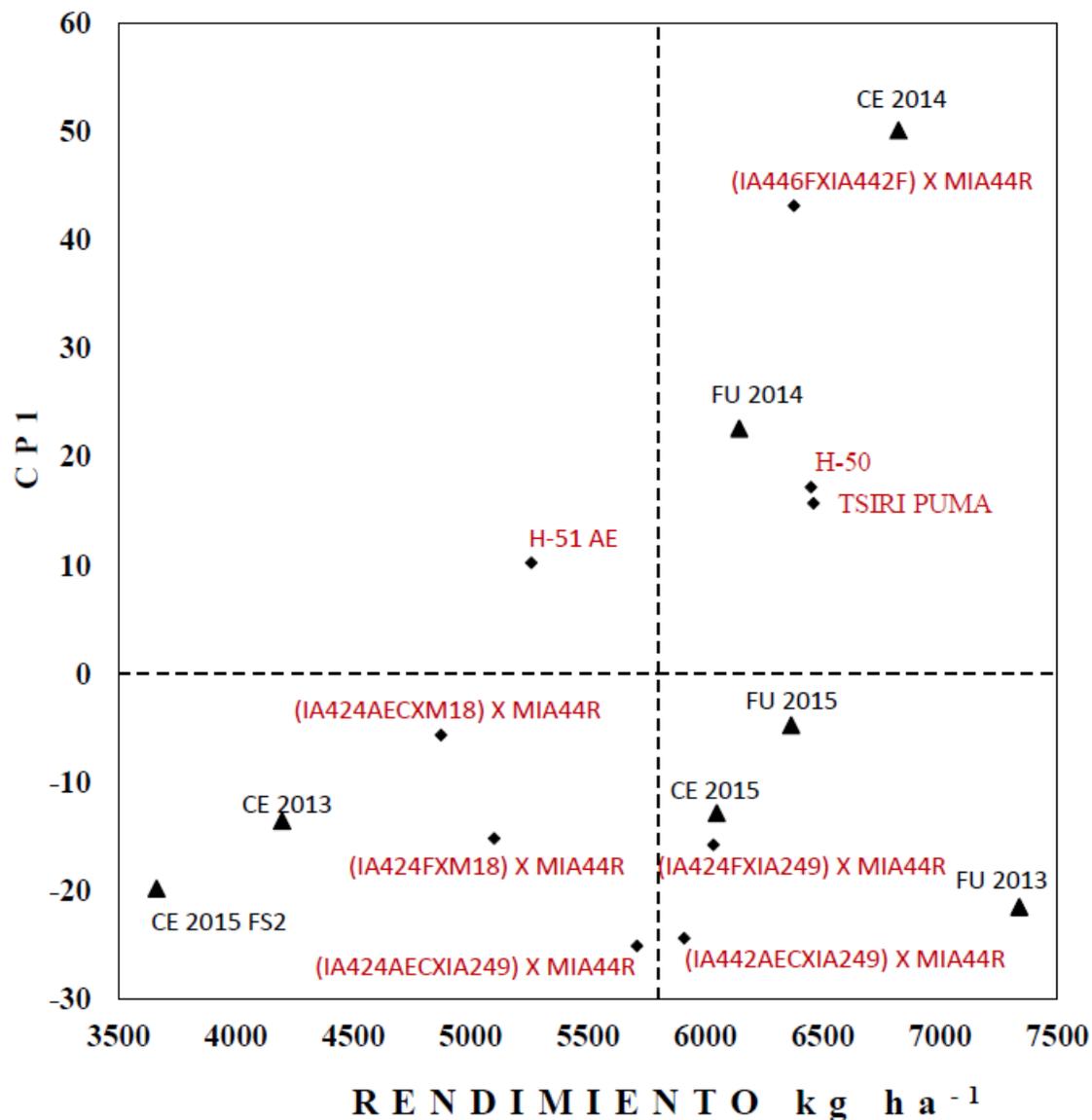


Figura 3. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de nueve híbridos de maíz evaluados en siete ambientes. FESC-UNAM y CEVAMEX INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015. FU: Ambiente FESC-UNAM; CE: Ambiente CEVAMEX; CP1: componente principal 1.

Los híbridos H-50 y Tsíri Puma presentaron mejor adaptación en el ambiente de la FESC-UNAM 2014; los híbridos H-51 AE y el híbrido experimental (IA446F X IA442F) X MIA44 R presentaron mejor adaptación en el ambiente de CEVAMEX 2014; el híbrido experimental (IA442AEC X IA249) X MIA44 R presentó una amplia adaptación en los ambientes CEVAMEX

2015, FESC-UNAM 2013, y FESC-UNAM 2015; los híbridos experimentales (IA424AEC X M18) X MIA44 R, y (IA424F X M18) X MIA44 R tuvieron mejor adaptación en los ambientes CEVAMEX 2013, FESC-UNAM 2013, y CEVAMEX 2015; los híbridos experimentales (IA424F X M18) X MIA44 R y (IA424AEC X IA249) X MIA44 R tuvieron mejor adaptación en el mejor ambiente de prueba CEVAMEX 2013, y de igual manera en el ambiente con las peores condiciones de productividad CEVAMEX 2015 en la segunda fecha de siembra, respuesta que podría tener explicación en que la línea M18 descende del llamado maíz latente, que confiere cierta rusticidad a los híbridos en los que participa (Espinosa *et al.*, 2003).

De los genotipos evaluados, el más estable fue el híbrido experimental (IA424F X M18) X MIA44 R, por cercanía al origen del biplot AMM12, seguido del testigo comercial H-51 AE, lo que se explicaría por la participación de la línea M18, como se señala en otros trabajos (Espinosa *et al.*, 2003). El ambiente que mejor discriminó a los genotipos fue CEVAMEX 2015 en la segunda fecha de siembra, ya que la longitud del vector, desde origen al punto donde se ubica por sus valores de los componentes principales CP1 y CP2, indican la magnitud de su varianza (Figura 4).

En la Figura 4 el biplot GGE-SREG forma un polígono, el cual es una visualización bidimensional del rendimiento y la estabilidad basada en los valores del CP1 y CP2 (Samonte *et al.*, 2005; Yan *et al.*, 2001). El CP1 y CP2 representaron el 83.23 % de la interacción GE, de los cuales, el CP1 representó 58.96 % y el CP2 24.27 %. Por lo tanto, el modelo biplot de GGE explicó un porcentaje considerable de la variabilidad, permitiendo realizar deducciones significativas.

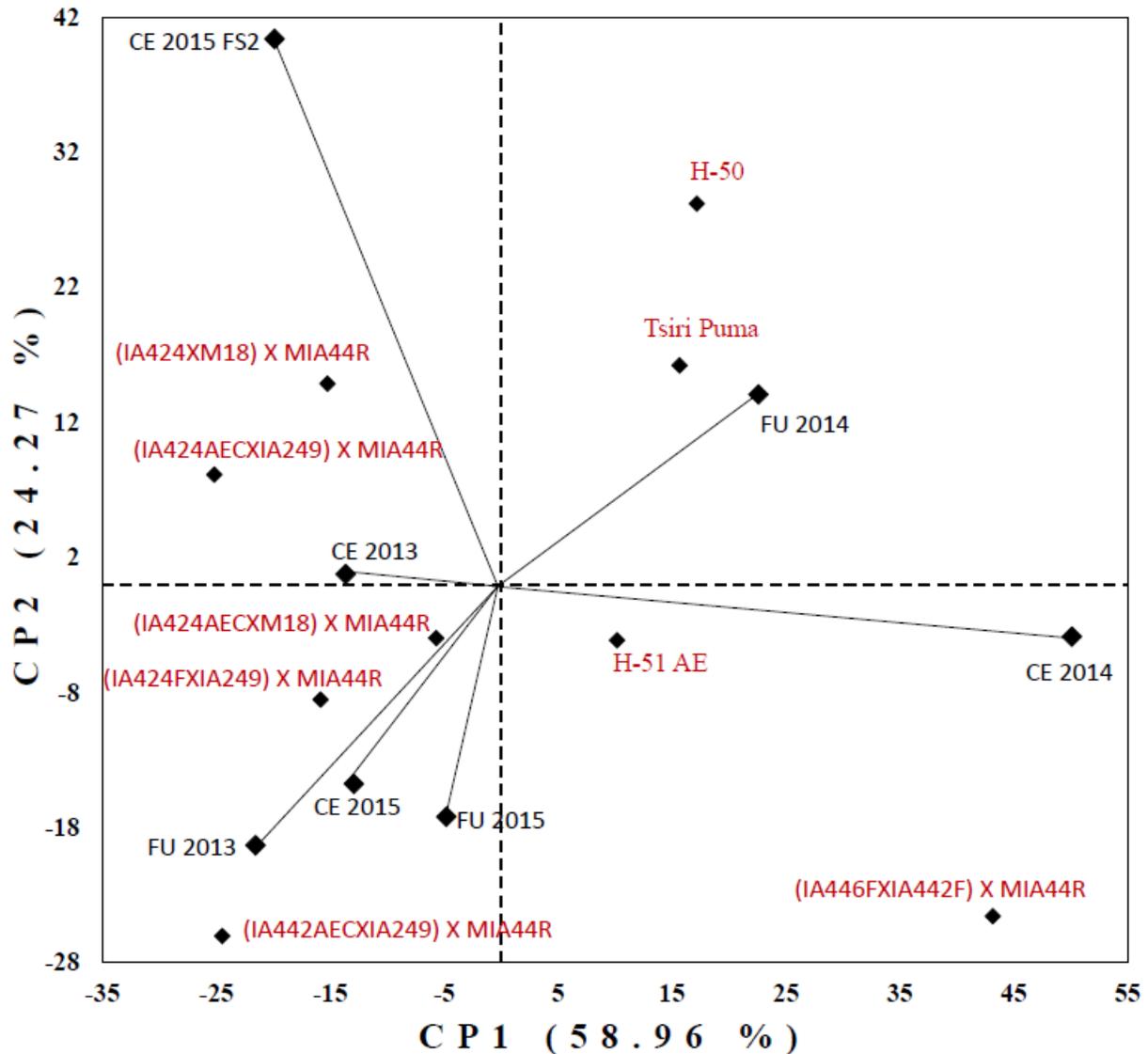


Figura 4. Biplot AMMI para nueve híbridos evaluados en siete ambientes. FESC-UNAM y CEVAMEX INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015. FU: Ambiente FESC-UNAM; CE: Ambiente CEVAMEX; CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2.

Los genotipos y entornos produjeron seis sectores en el biplot por las líneas trazadas desde el origen y perpendiculares a cada lado del polígono (Figura 5, líneas discontinuas de color negro). El método GGE biplot SREG identificó tres mega-ambientes, ordenados en función del potencial productivo de cada uno, definidos por la localidad y el año de cultivo. El primer mega-ambiente tuvo los ambientes FESC-UNAM 2014 (3) y CEVAMEX 2014 (4), e incluyó a los híbridos H-50,

Tsíri Puma, (IA446F X IA442F) X MIA44 R y el H-51 AE. El segundo mega-ambiente fueron los ambientes de CEVAMEX 2013 (2), FESC-UNAM 2014 (5), y CEVAMEX 2014 (6), los cuales tuvieron los vectores más cortos, y por tanto la magnitud de sus varianzas fue menor que en los otros ambientes de prueba, además los genotipos tuvieron un buen potencial de rendimiento y la media de los tres ambientes fue muy similar. En el tercer mega-ambiente estuvieron FESC-UNAM 2013 (1) y CEVAMEX 2015 (7) en la segunda fecha de siembra, los cuales presentaron el mayor y menor potencial de rendimiento, respectivamente. El mega-ambiente que incluye los ambientes de la FESC-UNAM 2013 (1) y CEVAMEX 2015 (7) en la segunda fecha de siembra, por la longitud de sus vectores fuera del polígono, y que no agrupan algún genotipo en el biplot, mostraron los niveles más altos de interacciones GE, lo que también fue observado en el Método AMMI, pero sólo en el ambiente de CEVAMEX 2015 (7) en la segunda fecha de siembra.

El biplot GGE ubica a los genotipos en términos de adaptabilidad, de acuerdo con las estimaciones de los valores de CP1, y la estabilidad la definen los valores del CP2. Es así que los genotipos productivos y estables deben mostrar valores altos para el CP1, pero valores cercanos a cero para CP2. Los híbridos H-50, Tsíri Puma, y (IA446F X IA442F) X MIA44 R de acuerdo con los modelos AMMI y GGE biplot SREG presentaron el mismo nivel de correspondencia en cuanto a su adaptación específica a los ambientes FESC-UNAM 2014 (3) y CEVAMEX 2014 (4). De igual manera, se identificó al ambiente FESC-UNAM como el más adecuado para definir a los genotipos más productivos y estables, debido a que tuvieron valores altos de CP1 y CP2.

Bajo AMMI2, los híbridos H-50, Tsíri Puma, (IA446F X IA442F) X MIA44 R serían considerados como inestables por su lejanía con el origen, pero el método GGE biplot SREG indicó que son estables, con excepción de H-51AE que se identificó como estable y con adaptación específica en ambos métodos. Los genotipos ubicados en los vértices, (IA424AEC X M18) X MIA44 R, (IA424F X M18) X MIA44 R, (IA424AEC X IA249) X MIA44 R, (IA442AEC X IA249) X MIA44 R, y (IA424AEC X M18) X MIA44 R, mostraron rendimientos superiores a la media nacional, pero no fueron los mejores en este trabajo debido a que se alejaron de los vectores de los ambientes, reflejando una baja adaptabilidad en los siete ambientes de prueba. El biplot AMMI2 identificó al híbrido con fertilidad restaurada (IA424AEC X M18) X MIA44 R y al H-51AE como los más estables por su cercanía al origen y sus valores bajos de CP1, pero su rendimiento fue bajo y su media a través de ambientes fue inferior a la media general.

2.6 CONCLUSIONES

Los genotipos con menores efectos de interacción GE y que se consideraron los más estables por el método AMMI fueron el híbrido con fertilidad restaurada (IA424AEC X M18) X MIA44 R y el H-51 AE, con rendimientos inferiores a la media general del estudio, pero mayores a la media nacional ($3\ 600\ \text{hg ha}^{-1}$). El mejor ambiente de prueba para este modelo fue FESC-UNAM 2015 por sus bajos valores de CP1, y su rendimiento medio mayor a la media general de la investigación.

El modelo SREG identificó a los híbridos H-50, Tsíri Puma, (IA446F X IA442F) X MIA44 R, y H-51 AE como los más estables y con adaptación específica en los ambientes FESC-UNAM 2014 (3) y CEVAMEX 2014 (4), los cuales conformaron de manera espacial en el GGE biplot SREG, el mega-ambiente más grande en este análisis.

Ambos modelos son complementarios para el estudio de la interacción GE y la determinación de genotipos estables, pues ambos presentan herramientas sencillas para poder interpretar de una manera eficiente la interacción de los genotipos en los ambientes de prueba. El modelo AMMI es más eficiente para explicar la interacción GE, y para definir a los genotipos estables. El modelo SREG hace un agrupamiento en mega-ambientes de los ambientes de prueba, lo cual facilita definir los genotipos con adaptación en ambientes específicos.

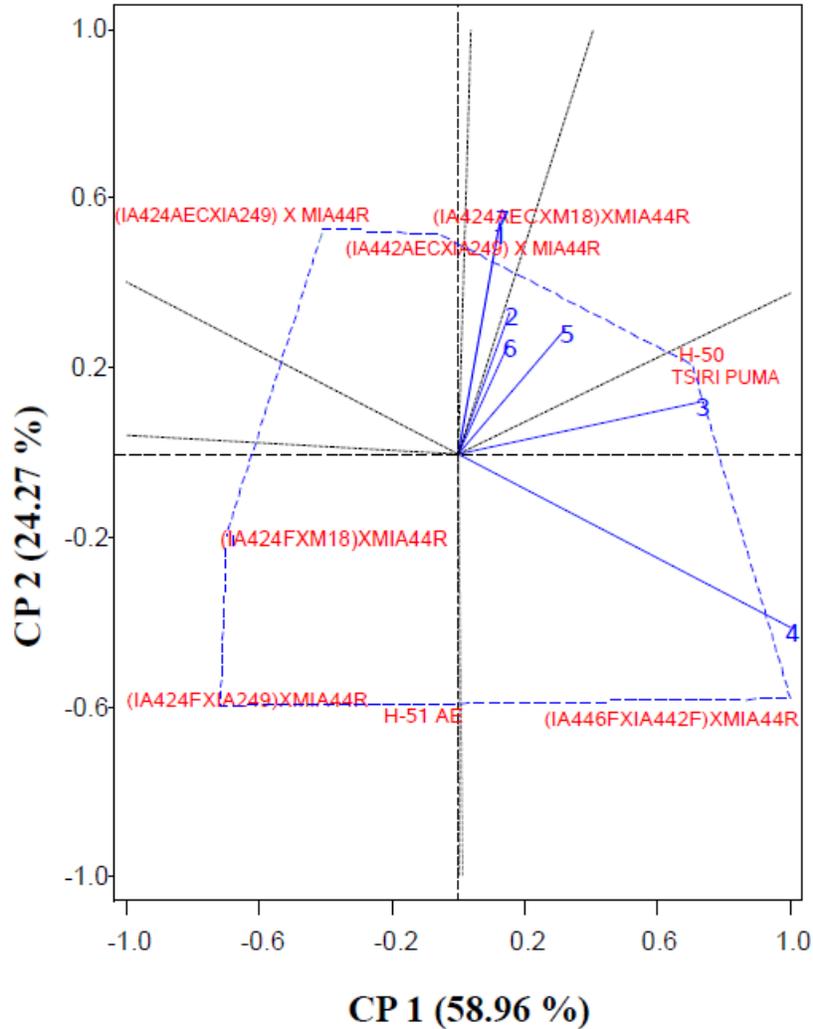


Figura 5. Biplot GGE-SREG para nueve híbridos evaluados en siete ambientes. FESC-UNAM y CEVAMEX INIFAP, Primavera – Verano 2013, 2014 y 2015. 1: FESC-UNAM 2013; 2: CEVAMEX 2013; 3: FESC-UNAM 2014; 4: CEVAMEX 2014; 5: FESC-UNAM 2015; 6: CEVAMEX 2015; 7: CEVAMEX 2015 Segunda fecha de siembra. CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2.

2.7 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT: IT201618, UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Carretera Cuautitlán - Teoloyucan, km 2.5. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. CP. 54714. AP. 25. Tel. 01 55 56231971.

2.8 LITERATURA CITADA

- Alejos, G., Monasterio, P., y 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.
- Allard, R. W. and A. D. Bradshaw. 1964. Implications of genotype environment interactions in applied plant breeding. *Crop Science*. 4: 503-507.
- Ávila, M., J. Arellano, J. Virgen, y J. Gámez. 2009. ‘H-52’, híbrido de maíz para Valles Altos de la Mesa Central de México. *Agric. Téc. Méx.* 35: 237-240.
- Badu-Apraku, B., A Menkir, S. O. Ajala, R. O. Akinwale, M. Oyekunle, and K. Obeng-Antwi. 2010. Performance of tropical early-maturing maize cultivars in multiple stress environments. *Canadian Journal Plant Science*. 90: 831-852.
- Becker, H. C. 1981: Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica*. 30, 835—S4C.
- Becker, H. C., and J. Leon. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant breeding*. 101: 1-23.
- Blanche, S. B., and G. O. Myers. 2006. Identifying discriminating location for cultivar selection in Louisiana. *Crop Science* 4:946-949.
- Cooper, M. P. 1999. Genotype x environment interactions, selection response and heterosis. *In: Coors, J. G. and Pandey, S. (Eds.). The genetics and exploitation of heterosis In: Crops. Crop science society of America. CIMMYT. Madison, Wisconsin, USA. 81-92 pp.*
- Cornelius, P. L., and J. Crossa. 1999. Prediction assessment of shrinkage estimators of multiplicative models for multienvironment cultivar trials. *Crop Science*. 99: 998-1009.
- Crossa, J., J. Burgueño, P. L. Cornelius, G. McLaren, R. Trethowan, and Krishnamachari. 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., Y. Rong-Cai, and P. L. Cornelius. 2004. Studying crossover genotype × environment interaction using linear-bilinear models and mixed models. *JABES*. 9: 362-380.
- Eeuwijk, F. V. 2006. Genotype by environment interaction. Basics and beyond. *In: Lamkey, K. R. and Lee, M. (Eds.). Plant breeding: the Arnel H. International Symposium. México. 155-170 pp.*

Edbon, J. S., and H. G. Gauch. Jr. 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turfgrass performance trials: I. Interpretation of genotype x environment interaction. *Crop Science*.42, 489-469.

Espinosa C., A., M. Tadeo R., J. Lothrop, S. Azpiroz R., C. Tut y C., Y. Salinas M. 2003. H-50 híbrido de maíz de temporal para los Valles Altos de México (2200 a 2600 msnm). *Agricultura Técnica en México*. 29: 89-92.

Espinosa-Calderón, A. M. Tadeo-Robledo, M. Sierra-Macías, F. Caballero-Hernández, R. Valdivia-Bernal, y N. O. Gómez-Montiel. 2010. Despanojado y densidad de población en una cruz simple androestéril y fértil de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 1: 159-165.

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

Fuentes, L. M., y Quemé, W. R. 2005. Evaluación de híbridos de maíz de grano amarillo y blanco en diferentes ambientes de México y Centro América. Informe del PCCMA Guatemala. Abril 2005.

Gauch, H. G. Jr. 2013. A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. *Crop Science*. 53: 1860-1869.

Glasser, A. 2010. The use of biplots in statistical analysis: with examples in GenStat. European GenStat and ASRml applied statistics conference, 14 July 2010, Hemel Hempstead.

Glasser, A. 2012. GGe biplot procedure, GenStat for Windows introduction, 15th edition. VSN International, Hemel Hempstead.

Gollob, H. F. 1968. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika*. 33:73-115.

Kang, M. S. 1993. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: consequences for growers. *Agronomy Journal*. 85:754-757.

Kempton, R. 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *The Journal of Agricultural Science*. 103:123 - 135.

Malvar, R. A., O. Revilla, A. Butron, B Gouesnard, A. Boyat, P. Soengas, A. Alvarez, and A. Ordes. 2005. Performance of crosses among French and Spanish maize populations across environments. *Crop Science*. 45:1052-1057.

Medina, S. C., V. Marín, A. Segovia, Z. Bejarano, R. A. Venero, y E. Meléndez. 2002. Evaluación de la estabilidad del rendimiento de variedades de maíz en siete localidades de Venezuela. *Agronomía Tropical*. 52:255-275.

Mohammadi, R., A. Amri, R. Haghparast, D. Sadeghzadeh, M. Armion, and B. M. Ahmadi M. 2009. Pattern analysis of genotype by environment interaction for grain yield in durum wheat. *The Journal Agricultural Science*. 147: 537-545.

Palemón, A. F., N.O. Gómez M., F. Castillo G., P. Ramírez V., J. D. Molina G., y S. Miranda C. 2012. Estabilidad de cruza intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia*. 46. 133-145.

Ramburan, S., M. Zhou, and M. Labuschagne. 2011. Interpretation of genotype \times environment interactions of sugarcane: Identifying significant environmental factors. *Field Crops Research*. 124: 392–399.

Shim, K. B., S. H. Hyu, J. Y. Shon, S. G. Kang, W. H. Yang, and S. G. Heu. 2015. Interpretation of genotype \times environment interaction of sesame yield using GGE biplot analysis. *Korean Journal Crop Science*. 60: 349-354.

Sabaghnia, N., S.H. Sabaghpour, and H. Dehghani. 2008. The use of an AMMI model and its parameters to analyze yield stability in multi-environment trials. *The Journal Agricultural Science*. 146: 571–581.

Samonte S., O. P. B., L. T. Wilson, A. M. Chang, and J. C. Medley. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environment using AMMI and SREG GGE biplot analysis. *Crop Science*. 45:2414-2424.

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

Schnable, P. S., and R. P. Wise. 1998. The molecular basis of cytoplasmic male sterility and fertility restoration. *Trends in plant science*, 3(5):175-180, 1998.

Tadeo R., M., A. Espinosa C., J. J. García Z., R. Lobato O., N. O. Gómez M., M. Sierra M., R. Valdivia B., B. Zamudio G., B. Martínez Y., C. López L., K. Y. Mora G., E. I. Canales I., A. L. Cárdenas M., J. Zaragoza E., H. J. Alcántar L. (2016). Tsiri Puma, híbrido de maíz para valles altos con esquema de androesterilidad para producción de semillas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 39: 331-333.

Tadeo-Robledo, M., A. Espinosa-Calderón, A. Turrent-Fernández, B. Zamudio-González, M. Sierra-Macías, N. Gómez-Montiel, R. Valdivia-Bernal, y J. Virgen-Vargas. 2014. Rendimiento de híbridos androestériles y fértiles de maíz en dos localidades en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5: 883-891.

Vargas, M. y J. Crossa, 2000. *The AMMI Analysis and Graphing the Biplot*. Biometrics and Statistical Unit, CIMMYT. México. 42 p.

Vélez-Torres, M., J. J. García-Zavala, R. Lobato-Ortiz, I. Benítez-Riquelme, J. J. López-Reynoso, J. A. Mejía-Contreras, G. Esquivel-Esquivel. 2018. Estabilidad del rendimiento de cruzas dialélicas entre líneas de maíz de alta y baja aptitud combinatoria general. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 41: 167 – 175.

Yan, W. and L. A. Hunt. 1998. Genotype by environment interaction and crop yield. *Plant Breeding Review*. 16: 135-178.

Yan, W.; A. Hunt; Q. Sheng and Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*. 40: 597-605.

Yan W., P. L. Cornelius, J. Crossa and L. A. Hunt. 2001. Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science*. 41:656-663.

Yan, W. y M. S. Kang. 2003. *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Yan, W. y N. A. Tinker. 2005. An integrated system of biplot analysis for displaying, interpreting, and exploring genotype-by-environment. *Crop Science*. 45:1004-1016.

Yan, W. y N. A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data; principles and application. *Canadian Journal of Plant Science*. 86: 623-645.

Yan, W., M. S. Kang, B. Ma, S. Woods, P. L. Cornelius. 2007. GGE biplots versus AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*. 47: 643-655.

Zobel, R. W., M. J. Wright, y H. G. Gauch. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*. 80: 388-393.

SIAP – SAGARPA. 2018. <https://www.gob.mx/siap>

SNICS – SAGARPA. 2018. <https://www.gob.mx/snics>

CAPÍTULO III. PRODUCTIVIDAD Y ESTABILIDAD DE NUEVOS HÍBRIDOS DE MAÍZ CON ESQUEMA DE ANDROESTERILIDAD Y FERTILIDAD RESTAURADA DE LA UNAM E INIFAP PARA VALLES ALTOS

3.1 RESUMEN.

La androesterilidad y el uso de progenitores con capacidad de restauración de la fertilidad masculina en la producción de semilla híbrida de maíz (*Zea mays* L.) es esencial para mantener la calidad genética de la semilla mejorada. Éstas herramientas ya son conocidas en el fitomejoramiento por las empresas Pioneer y Monsanto, pues el 80% de las variedades que generan es utilizando progenitores androestériles y con capacidad restauradora de la fertilidad masculina. De ahí la importancia del mejoramiento genético realizado por instituciones de investigación pública como la UNAM e INIFAP, utilizando sus fuentes de androesterilidad y de restauración de la fertilidad masculina, para la formación de variedades mejoradas que satisfagan las necesidades en la producción de grano de maíz de los agricultores de los Valles Altos de México. El objetivo de esta investigación fue evaluar la productividad y la estabilidad del rendimiento de grano de nuevos híbridos de maíz con esquema de androesterilidad y fertilidad restaurada de la UNAM e INIFAP en los Valles Altos de México. Se evaluaron veintidós genotipos en el ciclo primavera-verano de 2016, en el estado de México: FES Cuautitlán UNAM y CEVAMEX INIFAP, en esta segunda localidad, con dos fechas de siembra. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los datos de rendimiento y otras variables se analizaron en forma factorial, considerando ambientes, bloques, genotipos y sus interacciones como fuentes de variación. El análisis de varianza combinado detectó diferencias altamente significativas entre ambientes y entre genotipos para todas las variables. Para rendimiento se tuvo un coeficiente de variación de 19.2% y una media general de 7810 kg ha⁻¹. La interacción Genotipo x Ambiente resultó significativa para rendimiento, y altamente significativa para las variables floración masculina y floración femenina. La comparación de medias entre ambientes indicó que en FESC-UNAM, se tuvo el mejor rendimiento con 9309 kg ha⁻¹, mientras que entre genotipos el híbrido que expresó mayor rendimiento fue CSRMXMA46 con 10085 kg ha⁻¹, seguido de ATZIRI PUMA, con 10028 kg ha⁻¹, los cuales son híbridos con fertilidad restaurada que superaron a los testigos comerciales, lo que señala perspectivas favorables de uso comercial. El ambiente de FESC-UNAM tuvo mayor productividad, en comparación con la localidad CEVAMEX, INIFAP en sus dos fechas de siembra. Los genotipos con menores efectos de interacción GE por sus valores del

componente principal 1 fueron el Tlaoli Puma 4, Atziri Puma y CSR M X MIA46. El híbrido que se consideró más estable por el método AMMI fue el híbrido con fertilidad restaurada Tlaoli Puma 4.

Palabras clave: *Zea mays* L., androesterilidad, AMMI, estabilidad, rendimiento, restauración de la fertilidad masculina.

PRODUCTIVITY AND STABILITY OF NEW MAIZE HYBRIDS WITH SCHEME OF ANDROESTERILIDAD AND RESTORED FERTILITY OF THE UNAM AND INIFAP FOR HIGH VALLEYS

3.2 ABSTRACT

The male sterility and the use of progenitors with the capacity to restore male fertility in the production of hybrid maize seed (*Zea mays* L.) is essential to maintain the genetic quality of the improved seed. These tools in plant breeding is already known by the companies Pioneer and Monsanto, as 80% of the varieties they generate use male sterile progenitors with the capacity to restore male fertility. Hence the importance of genetic improvement carried out by public research institutions, such as UNAM and INIFAP, by using their own sources of andro-sterility and restoration of male fertility for the formation of improved varieties that meet the needs in the production of maize grain for the farmers of the High Valleys of Mexico. The objective of this research was to evaluate the productivity and stability of the grain yield of new maize hybrids with restored fertility and fertility scheme of the UNAM and INIFAP in the High Valleys of Mexico. Twenty-two genotypes were evaluated in the spring-summer season of 2016, in the state of Mexico: FES Cuautitlán UNAM and CEVAMEX INIFAP, in this second location, with two sowing dates. A randomized complete block design with three replications was used. Grain yield data and other traits were analyzed in a factorial way, considering environments, blocks, genotypes and their interactions as sources of variation. The combined analysis of variance detected highly significant differences between environments and between genotypes for all traits. For grain yield there was a coefficient of variation of 19.2% and a general average of 7,810 kg ha⁻¹. The Genotype x Environment interaction was significant for grain yield, and highly significant for the variables of pollen-shed and silking days. Mean comparisons between environments indicated that in FESC-UNAM, the best grain yield was obtained with 9,309 kg ha⁻¹, while among genotypes the hybrid

that expressed the highest grain yield was CSRMXMIA46 with 10,085 kg ha⁻¹, followed by ATZIRI PUMA, with 10,028 kg ha⁻¹, which are hybrids with restored fertility that surpassed commercial checks, indicating they are favorable prospects for commercial use. The environment of FESC-UNAM had higher productivity, compared to the locality CEVAMEX, INIFAP in its two sowing dates. The genotypes with lower GE interaction effects for their main component 1 values were the Tlaoli Puma 4, Atziri Puma and CSRM x MIA46. The hybrid that was considered more stable by the AMMI method was the hybrid with restored fertility Tlaoli Puma 4.

Keywords: *Zea mays* L, male sterility, AMMI, stability, performance, restoration of male fertility.

3.3 INTRODUCCIÓN

La androesterilidad y el uso de progenitores con capacidad de restauración de la fertilidad masculina en la producción de semilla híbrida de maíz (*Zea mays* L.) es esencial para mantener la calidad genética de la semilla mejorada. Para esto se requiere desespigar en forma oportuna y adecuada a las plantas del progenitor femenino; de esta manera se logrará que el progenitor masculino se cruce con el femenino al 100 % y además se evitará que este último se contamine con su propio polen. La aplicación de éstas herramientas en el fitomejoramiento por las empresas Pioneer y Monsanto es ya conocido, pues el 80% de las variedades que generan es utilizando progenitores androestériles y con capacidad restauradora de la fertilidad masculina. De ahí la importancia del mejoramiento genético realizado por instituciones de investigación pública como la UNAM e INIFAP, utilizando sus propias fuentes de androestrilidad y de restauración de la fertilidad masculina, con la finalidad de generar variedades mejoradas que satisfagan las necesidades en la producción de grano de maíz de los agricultores de los Valles Altos de México.

Para obtener semilla de alta calidad y con buena identidad genética en la producción comercial de semilla híbrida de maíz, es necesario realizar el desespigue cuando se utilizan progenitores androfértiles, y esto involucra el uso de 24 a 50 jornales por hectárea. Además de su alto costo económico y laboriosidad, el desespigue representa riesgos de perder calidad genética de la semilla si éste se efectúa en forma incorrecta. Ante ello, el empleo de la androesterilidad puede ser una opción viable y práctica para la obtención de semilla híbrida de adecuada calidad genética y para disminuir los costos de producción (Ramírez, 2006; Tadeo *et al.*, 2007; Tadeo *et al.*, 2014).

Otra forma de aprovechar la androesterilidad es utilizando progenitores machos con capacidad restauradora de la fertilidad masculina de un material, donde destaca el método ABR, que es característico en la producción de semilla en especies como el maíz, sorgo (*Sorghum bicolor* L.), trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oryza sativa*), girasol (*Helianthus annuus*), cebolla (*Allium cepa*), entre otras (Poehlman, 2005; Mendoza *et al.*, 2006; Cisneros *et al.*, 2012; Ba *et al.*, 2014). El procedimiento consiste en cruzar una línea A que es androestéril con una línea B, la cual es fértil pero no restauradora de la fertilidad, que se denomina Mantenedora. El resultado de la cruce anterior es un híbrido de cruce simple androestéril (AxB), que se cruzará como hembra con una línea R macho, denominada Restauradora, la cual debe evaluarse en diferentes ciclos agrícolas para confirmar que efectivamente restaure la fertilidad masculina. Al final, en la conformación del híbrido trilineal, se obtiene un genotipo completamente fértil.

A inicios de la década de 1970's en la faja maicera de EUA la esterilidad citoplasmática masculina (CMS) denominada CMS-T (Texas), fuente utilizada en aproximadamente en el 85% de los sistemas de producción de semillas híbridas de ese país, dejó de utilizarse por las empresas semilleras debido a los problemas de susceptibilidad de los genotipos androestériles al tizón foliar causado por el hongo *Bipolaris maydis* (Schnable y Wise, 1998; Simmons *et al.* 2001). A finales de la década de los setentas y principios de la década de los ochentas, se encontraron nuevas fuentes de esterilidad masculina citoplasmática (CMS), como la CMS tipo C (Charrúa) y la CMS tipo S (USDA) (Beckett, 1971; Laughman y Gabay-Laughman, 1983; Levings, 1990).

Desde 1992 la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM), y en el Campo Experimental Valle de México, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), trabajan en conjunto realizando trabajos de mejoramiento genético para incorporar la androesterilidad génica – citoplásmica a las líneas progenitoras hembras élite de algunos de los híbridos comerciales y experimentales desarrollados por la UNAM y el INIFAP (Tadeo *et al.*, 2007; Espinosa *et al.*, 2009). Posteriormente (1995-1997), se identificaron líneas con capacidad restauradora (Tadeo *et al.*, 2003), donde ha sido importante tener bien definido el patrón heterótico de los progenitores tanto androestériles, como en los progenitores macho con capacidad restauradora de la fertilidad, para obtener buena heterosis en la conformación final de los híbridos trilineales. Se ha tenido la limitante en la formación de los híbridos experimentales con fertilidad restaurada de que se han probado diferentes progenitores masculinos con esta condición y se han obtenido genotipos con bajo

potencial en el rendimiento de grano. Es por eso que se continúan haciendo nuevas evaluaciones y probando diferentes combinaciones para la formación de nuevos híbridos trilineales con progenitores hembra androestériles, y progenitores macho con capacidad restauradora de la fertilidad masculina que den buen rendimiento.

Los progenitores androestériles se han evaluado en diferentes condiciones ambientales (en el INIFAP Campo Experimental Valle de México, Estado de México, Campo Experimental de Iguala, Guerrero, y en el Campo Experimental de Cotaxtla, Veracruz) para verificar que los genotipos se mantienen sin producir polen, y poder definir que estos genotipos presentan estabilidad en el carácter de androesterilidad y la capacidad restauradora de las líneas mejoradas. En el caso de los últimos genotipos mencionados, se ha verificado que efectivamente restauren la fertilidad masculina en la F₁ del cruzamiento en el que participan.

Por otra parte, el fitomejorador debe identificar los genotipos sobresalientes por la estabilidad de su rendimiento y su adaptación, evaluando estas propiedades en multi-ambientes para recomendar su uso de manera comercial (Crossa *et al.*, 2006). Becker y Leon (1988) indican que un genotipo estable posee un rendimiento que no cambia, independientemente de cualquier variación de las condiciones ambientales en las que se desarrolle el individuo. Este genotipo estable no muestra ninguna desviación del nivel esperado del carácter, lo que significa que su variación entre los ambientes es cero. Para poder evaluar la estabilidad de los híbridos experimentales se utilizó el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) (Zobel *et al.*, 1988).

De los híbridos experimentales con fertilidad masculina restaurada que se evaluaron en esta investigación en el ciclo primavera-verano 2016 y en el año 2017, la FESC-UNAM logró la inscripción de los híbridos Atziri Puma y Tlaoli Puma ante el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV), con los números de registro MAZ – 1842 – 231117 y MAZ – 1844 – 231117, respectivamente, para ambos está en proceso el trámite para contar con los respectivos Títulos de Obtentor. Otros genotipos con fertilidad masculina restaurada están en la última etapa de investigación, validación y transferencia antes de ser liberados comercialmente. Partiendo de lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la productividad y la estabilidad del rendimiento de grano de nuevos híbridos de maíz con esquema de androesterilidad y fertilidad restaurada de la UNAM e INIFAP en los Valles Altos de México.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano de 2016 en el municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México, a una altitud de 2274 msnm, en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM). El experimento se estableció en una segunda localidad, ubicada en el predio Santa Lucía de Prías, del Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), municipio de Texcoco, Estado de México, localizado a una altitud de 2240 msnm, en esta localidad se establecieron dos diferentes fechas de siembra. En cada localidad y diferentes fechas de siembra se manejó una densidad de población de 70 000 plantas por hectárea, en los diferentes ciclos de cultivo. El primer ambiente fue definido como FESC-UNAM, el segundo ambiente se identificó como CEVAMEX 1, y el tercer ambiente como CEVAMEX 2 (la segunda fecha de siembra en esta localidad).

Los experimentos que se establecieron en la FESC-UNAM se manejaron bajo condiciones de secano, mientras que en el CEVAMEX se manejaron con punta de riego. Para el control de malezas se aplicó Gesaprim[®] (Atrazina) 2 kg/ha y Hierbamina[®] (2-4D amina) 2 L/ha.

En el presente estudio se evaluaron veintidós genotipos formados en la UNAM e INIFAP, como el H-48 (Espinosa *et al.*, 2003), H-53 AE, H-49AE y el Tsíri Puma (Tadeo *et al.*, 2016) que son híbridos de uso comercial y fueron usados como testigos; el resto de los genotipos son híbridos de maíz en fase experimental, los cuales en su conformación final participa un macho con capacidad restauradora de la fertilidad masculina, estos se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Material genético para determinar la productividad y estabilidad de nuevos híbridos de maíz con esquema de androesterilidad y fertilidad restaurada de la UNAM e INIFAP para Valles Altos de México. Primavera-verano 2016.

Híbridos experimentales	Tipo de híbrido	Origen
H-61	Trilineal	INIFAP
H-61 B	Trilineal	INIFAP
H-61 C	Trilineal	INIFAP
H-61 D	Trilineal	INIFAP
H-61 E	Trilineal	INIFAP
TLAOLI PUMA 1	Trilineal	UNAM
TLAOLI PUMA 2	Trilineal	UNAM
TLAOLI PUMA 3	Trilineal	UNAM
TLAOLI PUMA 4	Trilineal	UNAM
(IA442AE X IA249) X L352	Trilineal	UNAM/INIFAP
(IA442AE X IA249) X L353	Trilineal	UNAM/INIFAP
H-49 F	Trilineal	INIFAP
CSRM X MIA45	Trilineal	UNAM/INIFAP
CSRM X MIA46	Trilineal	UNAM/INIFAP
CSRM X MIA46 B	Trilineal	UNAM/INIFAP
CSRM X MIA 46 C	Trilineal	UNAM/INIFAP
CSRM X LQPM	Trilineal	UNAM/INIFAP
ATZIRI PUMA	Trilineal	UNAM
TSIRI PUMA	Trilineal	UNAM
H-48	Trilineal	INIFAP
H-49 AE	Trilineal	INIFAP
H-53 AE	Trilineal	INIFAP

La parcela experimental fue de un surco de 5 m de largo y 0.80 m entre surcos (unidad experimental). El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con tres repeticiones.

En cada parcela se evaluaron las variables: días a floración masculina, que se registra cuando el 50 % de las plantas de la parcela liberaron polen; días a floración femenina, cuando el 50 % de las plantas en la parcela expusieron los estigmas, en por lo menos tres centímetros; además, se hicieron revisiones diariamente para verificar que la espiga de cada planta de maíz producía anteras y a su vez estas liberaban polen. A la cosecha se tomó el peso de campo de las mazorcas de cada unidad experimental. Para determinar los componentes de rendimiento, se tomó una muestra representativa de cinco mazorcas en cada parcela, en las que se midieron las variables: longitud de mazorca, número de hileras por mazorca, número de granos por hilera, granos por mazorca, diámetro de mazorca, diámetro de olote, peso volumétrico, peso de 200 granos, porcentaje de grano, y porcentaje de humedad del grano, medido con un determinador de humedad eléctrico marca Stenlite[®], para obtener el porcentaje de materia seca. Para la presentación de los resultados de esta investigación, se tomaron las variables donde hubo significancia estadística, y se presentan en los cuadros correspondientes. La estimación del rendimiento de grano de cada genotipo se hizo mediante la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = (\text{PC} * \% \text{MS} * \% \text{G} * \text{FC}) / 8600$$

Dónde: PC: Peso de campo; %MS: Porcentaje de materia seca; %G: Porcentaje de grano; FC: Factor de conversión para obtener rendimiento por ha, se obtuvo al dividir 10000 m^2 / tamaño de la parcela útil en m^2 (4 m^2); 8600: es un valor constante, que permite estimar el rendimiento con una humedad uniforme del 14 %, que es a la cual se manejan las semillas en forma comercial.

Para el análisis estadístico de los datos se aplicó un análisis combinado de los ambientes de prueba, considerando como fuentes de variación los ambientes, genotipos y la interacción Genotipo \times ambiente. El análisis de varianza y la comparación de medias con la prueba de Tukey se realizaron con el programa SAS[®] versión 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

Para el estudio de la interacción genotipo por ambiente (GE), y para definir la estabilidad del rendimiento de grano de los de los genotipos se utilizó el modelo **de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI)**, el cual modela modela la respuesta de los ambientes, los genotipos y la IGA. El modelo se implementó con 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} = error.

Se realizó el análisis de varianza convencional para determinar los efectos de genotipos, de ambientes, y de sus interacciones, mientras que el residual no aditivo (interacción) fue analizado en la parte multiplicativa del modelo mediante el análisis de componentes principales (ACP). Se consideraron los dos primeros componentes principales para la explicación de la interacción genotipo x ambiente. La significancia de los componentes principales se definió por la prueba de Gollob (1968). La representación gráfica se obtuvo mediante los Biplots AMMI1 y AMMI2 (Zobel *et al.*, 1988; Yan *et al.*, 2000), donde la mayor parte de la variación debería estar expresada en los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2), ya que el biplot es la representación gráfica en dos ejes del comportamiento de una variedad en un ambiente particular (Kempton, 1984).

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado (Cuadro 3.2) detectó diferencias altamente significativas entre ambientes y entre genotipos para todas las variables ($P \leq 0.01$). Para rendimiento se tuvo un coeficiente de variación de 19.2 %, el cual es aceptable por las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento, tuvo una media general de 7810 kg ha⁻¹. La interacción Genotipo x Ambiente resultó significativa para rendimiento, y altamente significativa para las variables floración masculina y floración femenina. La diferencia estadística entre genotipos se debe a la contrastante base genética de los progenitores utilizados en la conformación de los híbridos finales. Las condiciones edáficas de ambas localidades determinan las diferencias estadísticas entre ambientes, debido a que los suelos de la localidad FESC-UNAM, son arcillosos, retienen mejor la humedad y con mejor fertilidad, en comparación a los suelos de la localidad de CEVAMEX, que son suelos

arenosos. En la interacción GE, la significancia indica que hubo una respuesta diferencial de los genotipos a través de los ambientes de prueba (Canales *et al.* 2016).

Cuadro 3.2. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza combinado para diversas variables de nuevos híbridos de maíz con fertilidad restaurados evaluados en tres ambientes. Ciclo Primavera – Verano 2016.

VARIABLES									
Fuente de Variación	G L	Rendimiento	FM	FF	P. H.	LM	GRA/HIL	GRA/MZ	Porcentaje de Grano
Ambientes	2	113819708.2**	49.8**	41**	55.4**	77.1**	116.7**	61798.6**	16.8**
Genotipo	21	13018301.1**	10.9**	9.1**	23.8**	3.3**	17.3**	5381.9**	10.2**
Bloque A	6	2626253.1	13**	11**	47.6**	0.7	2.5	1375.8	2.3
G x A	42	3623910.5*	6.6**	5.6**	8.5	1.03	4.7	1956.4	2.6
Error	126	2245627.9	3.1	2.6	7.9	1.02	4.6	1893.4	2
C.V.		19.2	2.4	2.1	3.7	6.7	7.2	8.9	1.8
Media		7809.6	74.3	75.4	74.8	15	30	449	84.2

G L: Grados de libertad; FM: Floración Masculina; FF: Floración Femenina; P. H.: Peso Hectolítrico; LM: Longitud de Mazorca; GRA/HIL: Granos por hilera; GRA/MZ: Granos por mazorca. Significancia estadística al 0.01 de probabilidad (**) y al 0.05 de probabilidad (*); C.V: Coeficiente de variación (%).

La comparación de medias entre ambientes (Cuadro 3.3) indicó que en FESC-UNAM, se tuvo el mejor rendimiento, con 9309 kg ha⁻¹, coincidiendo con Tadeo *et al.* (2015), donde los rendimientos fueron superiores en la FESC-UNAM, en comparación al ambiente del CEVAMEX.

El bajo rendimiento en la segunda fecha de siembra del CEVAMEX pudo deberse a la siembra retrasada, y a la menor disposición de agua por precipitación, afectando el llenado de grano de los

genotipos. En cuanto a las floraciones masculinas y femeninas hubo diferencias estadísticas, pero las variedades siguen siendo de ciclo intermedio (75 días).

Cuadro 3.3. Comportamiento medio de los ambientes de prueba para el rendimiento (kg ha^{-1}) y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2016.

Ambiente	Rendimiento (kg ha^{-1})	FM (Días)	FF (Días)	P. H. (kg hl^{-1})	LM (cm)	GRA/HIL	GRA/MZ	Porcentaje de grano
FESC-UNAM	9309 a	75 a	76 a	74.6 b	16.3 a	32 a	524 a	84.6 a
CEVAMEX 1	7253 b	74 b	75 b	75.8 a	14.5 b	30 b	472 b	83.6 b
CEVAMEX 2	6866 b	74 b	75 b	74.0 b	14.3 b	30 b	470 b	84.3 a
D.S.H. (0.05)	619	1	1	1.2	0.4	1	18	0.6

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

FM: Floración Masculina; FF: Floración Femenina; P. H.: Peso Hectolítrico; LM: Longitud de Mazorca; kg ha^{-1} : kilogramos por hectárea; cm: centímetros; GRA/HIL: Granos por hilera; GRA/MZ: Granos por mazorca; kg hl^{-1} : kilogramos por hectolitro.

En la comparación de medias entre genotipos (Cuadro 3.4), el híbrido que expresó mayor rendimiento fue CSRMXMA46 con 10085 kg ha^{-1} , seguido de Atziri Puma, con 10028 kg ha^{-1} , ambos genotipos fueron estadísticamente similares, superiores numéricamente al testigo comercial H-53 AE, con 9842 kg ha^{-1} . Posteriormente se encuentra el híbrido experimental H-61E con 8692 kg ha^{-1} , el CSRMXMA45 con 8546 kg ha^{-1} , el Tsíri Puma con 8250 kg ha^{-1} , el H-61 C con 8161 kg ha^{-1} , y el Tlaoli Puma 1 con 8134 kg ha^{-1} , dentro de los genotipos destacados en esta evaluación. Es necesario mencionar que los híbridos Atziri Puma y Tlaoli Puma, en el año 2017, fueron registrados en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV), y que el incremento de semilla comercial se ha iniciado a producir en el Estado de Puebla. La floración masculina en todos los híbridos presentó una variación de 72 a 76 días, mientras que la floración femenina varió de 74 a 77 días. No se tuvieron problemas de sincronía floral. Los valores de peso hectolítrico fueron de 71 kg hl^{-1} , hasta 77.7 kg hl^{-1} . En la longitud de mazorca la variación fue de 14 a 16 cm. Los valores de granos por hilera fueron de 28 a 33, mientras que los valores de granos por mazorca variaron de 445 a 537. El porcentaje de grano fue de 80.9 a 85.5 por ciento.

Cuadro 3.4. Comportamiento medio de nuevos híbridos de maíz con fertilidad masculina restaurada, en tres ambientes, para rendimiento (kg ha^{-1}), y otras variables. Ciclo Primavera – Verano 2016.

Genotipo	Rendimiento (kg ha^{-1})	FM (Días)	FF (Días)	P. H. (kg hl^{-1})	LM (cm)	GRA/HIL	GRA/MZ	Porcentaje de grano
CSRM X MIA46	10085 a	73 abcd	74 abc	74.1 abc	15 abc	33 a	506 abc	84.5 abc
ATZIRI PUMA	10028 a	74 abcd	75 abc	75 abc	15 abc	32 abcd	508 abc	85 ab
H-53 AE	9842 ab	74 abcd	76 abc	75.8 abc	15 abc	30 abcd	470 abc	84.5 abc
H-61 E	8692 abc	74 abcd	75 abc	72.8 bc	16 a	32 abcd	495 abc	82.7 bcd
CSRM X MIA45	8546 abcd	76 a	77 a	74.7abc	14 c	30 abcd	537 a	83.1 abcd
TSIRI PUMA	8250 abcde	74 abcd	75 abc	76.6 ab	15 abc	32 abcd	505 abc	84.4 abc
H-61 C	8161 abcde	74 abcd	75 abc	73.1 abc	15 abc	30 abcd	471 abc	85.5 a
TLAOLI PUMA 1	8134 abcde	73 bed	74 bc	76.1 ab	15 abc	30 abcd	471 abc	84 abc
(IA442AEXIA249) X L352	8123 abcde	76 a	77 ab	75.2 abc	15 abc	31 abcd	503 abc	85.1 ab
CSRM X MIA 46 C	8114 abcde	75 abc	76 ab	74.6 abc	16 a	33 a	516 abc	84.8 abc
TLAOLI PUMA 4	7859 abcde	74 abcd	75 abc	76.7 ab	15 abc	30 abcd	471 abc	84.8 abc
H-49 AE	7731 abcde	75 abc	76 ab	77.7 a	16 a	32 abc	527 ab	84.7 abc
CSRM X LQPM	7566 abcde	76 a	77 a	74.9 abc	15 abc	31 abcd	457 bc	80.9 d
CSRM X MIA46 B	7510 abcde	75 abc	77 a	75.3 abc	16 a	32 abc	501 abc	83.6 abc
H-49 F	7306 bcde	72 d	74 bc	75.6 abc	15 abc	32 abc	509 abc	84.3 abc
H-61 D	7284 bcde	74 abcd	75 abc	73.4 abc	15 abc	30 abcd	473 abc	83.9 abc
TLAOLI PUMA 2	7275 bcde	74 abcd	75 abc	76.3 ab	14 c	31 abcd	492 abc	84.7 abc
H-61	7113 cde	74 abcd	75 abc	74.2 abc	15 abc	29 bcd	470 abc	84.7 abc
(IA424AEXIA249) X L353	6520 cde	75 abc	77 ab	76 ab	15 abc	32 abc	501 abc	85.2 a
TLAOLI PUMA 3	6022 de	75 abcd	76 abc	75.6 abc	14 c	28 d	445 c	84.1 abc
H-48	5892 e	73 cd	74 bc	71.9 bc	15 abc	30 abcd	469 abc	84.8 abc

H-61 B	5757 e	74 abcd	76 abc	71 c	14 c	29 cd	459 bc	82.5 dc
D.S.H. (0.05)	2594	3	3	4.9	2	4	75	2.4

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

FM: Floración Masculina; FF: Floración Femenina; P. H.: Peso Hectolítrico; LM: Longitud de Mazorca; kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea; cm: centímetros; GRA/HIL: Granos por hilera; GRA/MZ: Granos por mazorca; kg hl⁻¹: kilogramos por hectolitro.

En el estudio de la interacción genotipo por ambiente (GE) (Cuadro 3.5), como ya se mencionó, hubo diferencias altamente significativas entre ambientes y entre genotipos para el rendimiento de grano, y hubo significancia para la interacción (GE). En la suma de cuadrados, la fuente de variación Bloques(Ambientes) aportó el 1.65%, los ambientes aportaron 23.9%, los genotipos aportaron 28.7%, y la interacción (GE) aportó el 16%. En este caso se obtuvieron valores ligeramente altos en los efectos de los genotipos, en comparación a los efectos de los ambientes, lo que coincide con lo obtenido por Canales *et al.*, 2016, y contrastando con los resultados obtenidos por Vélez *et al.* (2018), López (2013), y Pérez (2013), donde los efectos de los ambientes fueron mayores a los efectos genotípicos.

El modelo AMMI realiza una descomposición de la interacción GE en los componentes principales que sean necesarios, según las condiciones de cada estudio. Dentro de la interacción, de acuerdo con la prueba de Gollob (1968), los efectos del componente principal uno (CP1) resultaron altamente significativos ($P \leq 0.01$). Este componente principal explicó el 66.6 % de la variación total de la interacción GE, mientras que en el segundo componente principal (CP2) no hubo significancia y explicó el 33.4 %, sumando el 100% de la variación total en la Interacción GE, siendo ésta mayor al 60 %, se determina que la aplicación del modelo AMMI fue efectivo (Zobel *et al.*, 1988).

Cuadro 3.5. Análisis de varianza AMMI para rendimiento de grano de veintidós híbridos evaluados en tres ambientes FESC-UNAM y Santa Lucía INIFAP, Primavera – Verano 2016.

Fuente de Variación	GL	SC	CM	% SC
Bloques(Ambientes)	6	15757518.5	2626253.1	1.65 [†]
Ambientes	3	227639416.4	113819708.2**	23.9 [†]
Genotipos	21	273384323.1	13018301.1**	28.7 [†]
Interacción GE	42	152204242.7	3623910.5*	16 [†]
CP1	22	101301571.7	4604616.9**	66.6 ^{††}
CP2	20	50902671	2545133.5	33.4 ^{††}
Error	126	282949112.4	2245627.9	29.7 [†]
Total	197	951934613.1		
CV (%)	19.2			
Promedio	7 810	kg ha ⁻¹		

GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; % SC: porcentaje de la suma de cuadrados; CPI: componente principal 1; CP2: componente principal 2; CP3: componente principal 3; CV: coeficiente de variación; kg ha⁻¹: kilogramos por hectárea; †: respecto de la SC del total; ††: respecto de la SC de la interacción genotipo × ambiente; *: P ≤ 0.05; **: P ≤ 0.01.

En la Figura 6 se presenta el biplot AMMI1, el cual está diseñado considerando los efectos principales (valores de las medias de genotipos y ambientes) en la abscisa, y el efecto de interacción (estabilidad), los valores del CP1, en la ordenada (Zobel *et al.*, 1988; Yang *et al.*, 2001). Los genotipos que tuvieron valores absolutos bajos en el CP1, de baja interacción con el ambiente, fueron el H-48, Tlaoli Puma 3, Tlaoli Puma 4, Atziri Puma y CSRM X MIA46 pues presentaron valores del CP1 más cercanos a cero y tuvieron ligeros efectos de interacción GE, aunque sólo los

genotipos Tlaoli Puma 4, Atziri Puma y CSRM X MIA46, tuvieron valores de rendimiento superiores a la media general de la evaluación, y por lo tanto se identificaron como los más estables a través de ambientes (Zobel *et al.*, 1988, Medina *et al.*, 2002; Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012). Los híbridos experimentales H-49 F, CSRM X MIA 46 C y H-61 E, se encuentran más alejados del eje de las ordenadas, por esta circunstancia se considera que interaccionan de forma negativa con el ambiente. El ambiente con mejor comportamiento considerando sus valores absolutos del CP1, fue CEVAMEX en su primer fecha se siembra, aunque tuvo una media menor a la media general del experimento.

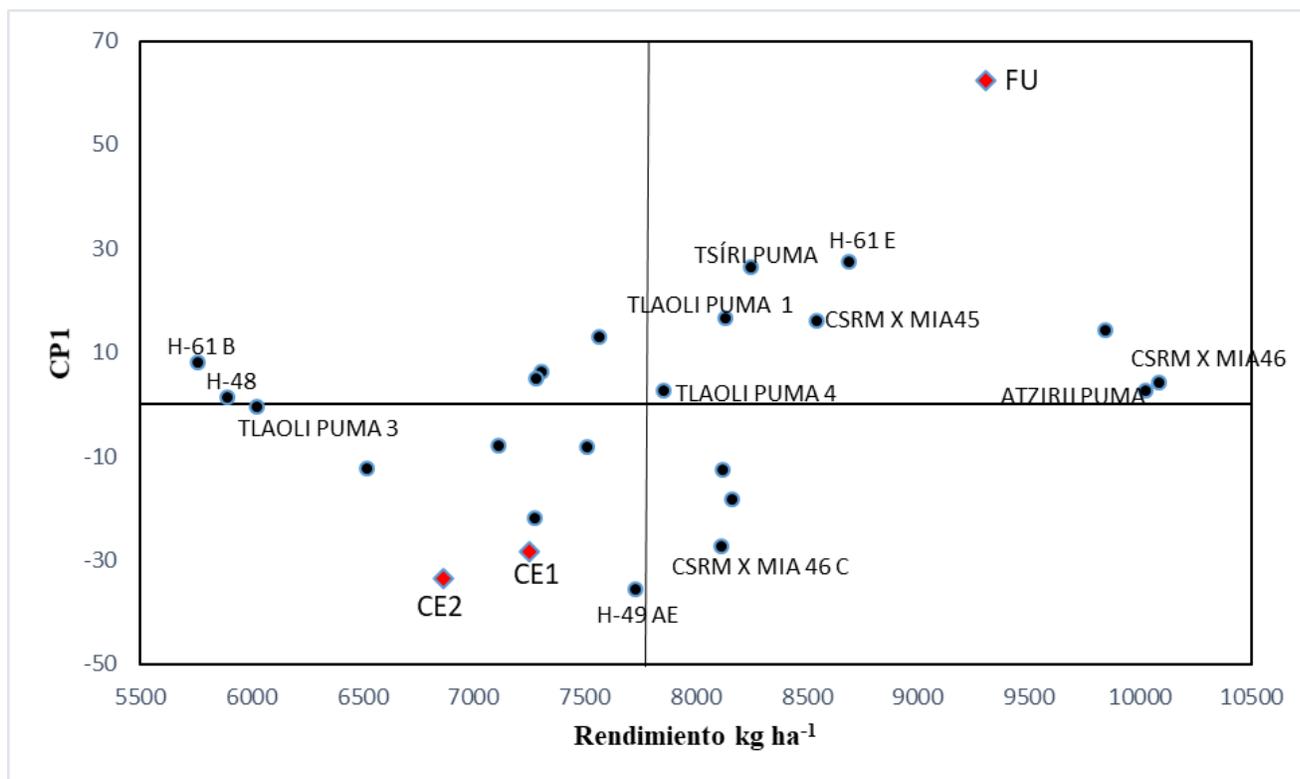


Figura 6. Biplot del CP1 en función del rendimiento promedio de veintidós híbridos de maíz evaluados en tres ambientes. FESC-UNAM (FU) y CEVAMEX INIFAP (CE), Primavera – Verano 2016. CE1: CEVAMEX primer fecha de siembra; CE2: CEVAMEX segunda fecha de siembra; CP1: componente principal 1.

El genotipo más estable fue el híbrido experimental Tlaoli Puma 4, por cercanía al origen del biplot AMM12, seguido del híbrido experimental H-61 D. El ambiente que mejor discriminó a los genotipos fue FESC-UNAM, ya que la longitud del vector, desde origen al punto donde se ubica

por sus valores de los componentes principales CP1 y CP2, indican la magnitud de su varianza (Figura 7).

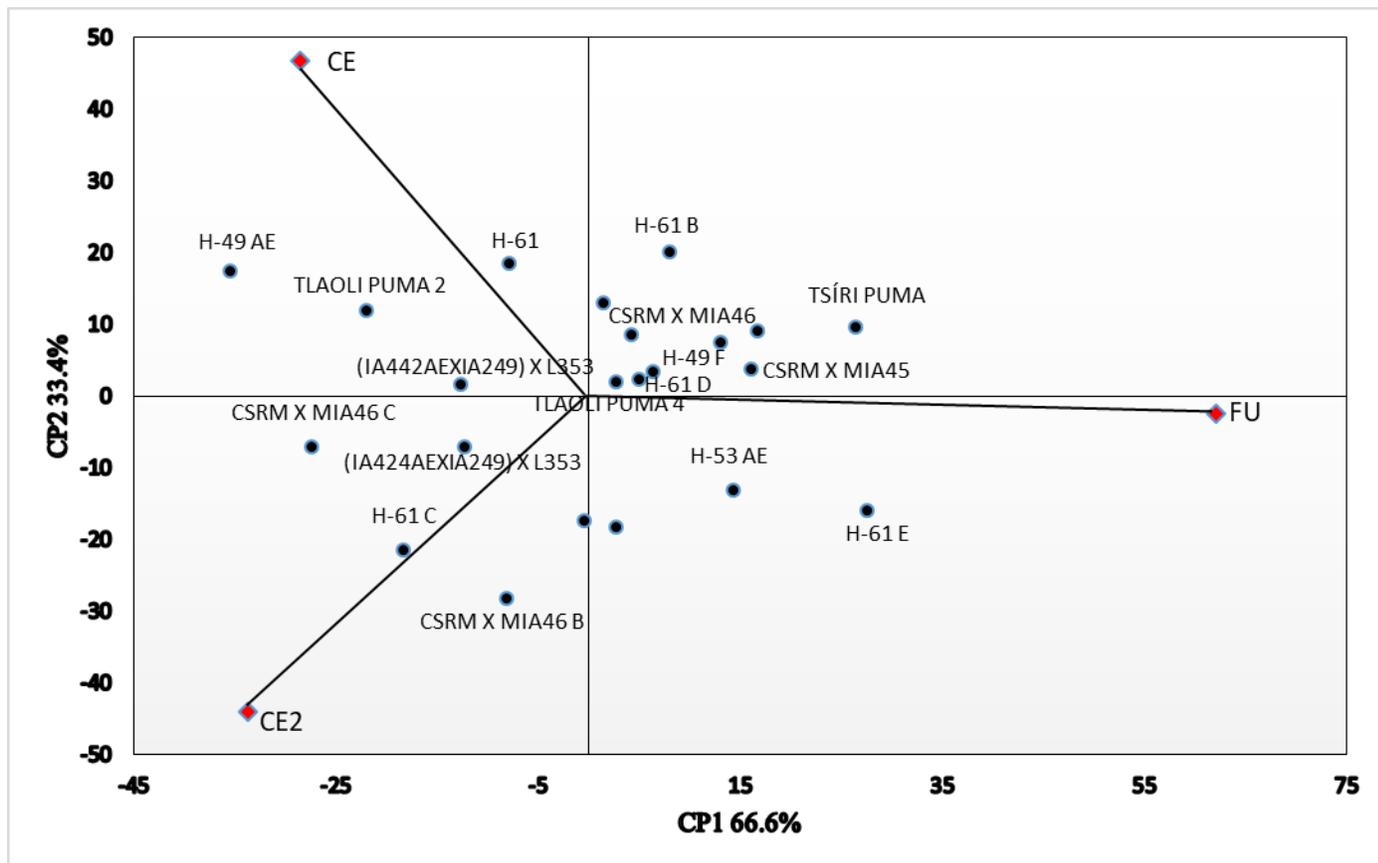


Figura 7. Biplot AMMI para veintidós híbridos de maíz evaluados en tres ambientes. FESC-UNAM (FU) y CEVAMEX INIFAP (CE), Primavera – Verano 2016. CE1: CEVAMEX primer fecha de siembra; CE2: CEVAMEX segunda fecha de siembra; CP1: componente principal 1; CP2: componente principal 2.

3.6 CONCLUSIONES.

Los mejores rendimientos correspondieron a híbridos con fertilidad restaurada CSR X MIA46 y Atziri Puma, que superaron a los testigos comerciales, sin capacidad restauradora de la fertilidad masculina, lo que los señala con perspectivas favorables de uso comercial. El ambiente de FES Cuautitlán, UNAM tuvo mayor productividad, en comparación con la localidad CEVAMEX, INIFAP en sus dos fechas de siembra.

Los genotipos con menores efectos de interacción GE por sus valores del componente principal 1 fueron el Tlaoli Puma 4, Atziri Puma y CSRM X MIA46. El híbrido que se consideró más estable por el método AMMI fue el híbrido con fertilidad restaurada Tlaoli Puma 4.

3.7 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT: IT201618, UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Carretera Cuautitlán - Teoloyucan, km 2.5. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. CP. 54714. AP. 25. Tel. 01 55 56231971.

3.8 LITERATURA CITADA

Alejos, G., Monasterio, P., y 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.

Ba, Q., G. Zhang, N. Niu, S. Ma, J. Wang. 2014. Cytoplasmic effects on DNA methylation between male sterile lines and the maintainer in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Gene*. 549: 192-197.

Beckett, J. B. 1971. Classification of male-sterile cytoplasms in maize (*Zea mays* L.). *Crop Science*. 11: 724-727.

Becker, H. C., and J. Leon. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant breeding*. 101: 1-23.

Blanche, S. B., and G. O. Myers. 2006. Identifying discriminating location for cultivar selection in Louisiana. *Crop Science* 4:946-949.

Canales, I. E. I., M. Tadeo R., J. A. Mejía C., J. J. García Z., A. Espinoza C., F. Castillo G., M. Sierra M. y N. Gómez M. 2016. Estabilidad del rendimiento de grano en híbridos trilineales androestériles de maíz para valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 7, Núm. 8; p. 1815-1827.

Cisneros L. M. E., L. E. Mendoza O., V. A. González H. 2012. Male parent effects on stigma receptivity and seed set of sorghum A-lines under chilling field temperatures. *Plant breeding*. 131: 88-93.

Crossa, J., J. Burgueño, P. L. Cornelius, G. McLaren, R. Trethowan, and Krishnamachari. 2006. Modeling genotype x environment interaction using additive genetic covariances of relatives for predicting breeding values of wheat genotypes. *Crop Science*. 46: 1722-1733.

Espinosa, C. A., Tadeo R. M., Lothrop J., Azpíroz R. S., Martínez M. R., Pérez C. J. P., Tut y Couoh 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. 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.

Gollob, H. F. 1968. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika*. 33:73-115.

Kempton, R. 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *The Journal of Agricultural Science*. 103:123 - 135.

Laughman, J. R. and S. J. Gabay-Laughman. 1983. Cytoplasmic male sterility in maize. *Annual Review of Genetics*. 17: 27-43.

Levings, C.S. III, and D.R. Pring. 1976. Restriction endonuclease analysis of mitochondrial DNA from normal and Texas cytoplasmic male sterile maize. *Science* 193:158–160.

López, G. J. A. 2013. Evaluación agronómica e interacción genotipo-ambiente en poblaciones de maíz de la raza Jala. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 23 p.

Medina, S. C., V. Marín, A. Segovia, Z. Bejarano, R. A. Venero, y E. Meléndez. 2002. Evaluación de la estabilidad del rendimiento de variedades de maíz en siete localidades de Venezuela. *Agronomía Tropical*. 52:255-275.

Mendoza, V. R., M. H. Reyes V., C. Espinosa Z., J. A. Villareal Q. 2006. Viabilidad de polen de una línea de girasol cultivado, en el girasol silvestre (*Helianthus annuus* L. SSP. *Texanus* Heiser) y en su descendencia híbrida. *Acta Botánica Mexicana*. 76: 47-57.

Palemón, A. F., N.O. Gómez M., F. Castillo G., P. Ramírez V., J. D. Molina G., y S. Miranda C. 2012. Estabilidad de cruas intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia*. 46. 133-145.

Pérez, L. F. J. 2013. Aptitud combinatoria y estabilidad de líneas de alto rendimiento derivadas de maíz exótico tropical. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 23 p.

Poehlman, J. M. 2005. Mejoramiento Genético de las cosechas. 2ª ed. Editorial Limusa. D. F., México. 511 p.

Ramírez, L. 2006. Utilización de la Androesterilidad para la producción de semilla híbrida. Cátedra de Producción vegetal genética y mejora vegetal. Departamento de producción agraria. Universidad Pública de Navarra, España. 7 p.

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

Schnable, P. S. and R. P. Wise. 1998. The molecular basis of cytoplasmic male sterility and fertility restoration. *Trends in plant science*. 3: 175-180.

Simmons, C. R., Grant S., Altier D. J., Dowd P. F., Crasta O., Yalpani N. 2001. Maize *rhml* resistance to *Bipolaris maydis* is associated with few differences in pathogenesis-related proteins and global mRNA Profiles. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 14: 947-954.

Tadeo, R. M., Espinosa C., A., Solano A. M. y Martínez 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., Beck L. D., Torres, J. L. 2007. Rendimiento de semilla de cruzas simples fértiles y androestériles progenitoras de híbridos de maíz. *Agricultura Técnica en México*. 33 (2): 175-180.

Tadeo-Robledo, M.; Espinosa-Calderón, A.; Turrent-Fernández, A.; Zamudio-González, B.; Zamudio-González, B.; Sierra-Macías, M.; Gómez-Montiel, N.; Valdivia-Bernal, R.; Virgen-Vargas, J. 2014. Rendimiento de híbridos androestériles y fértiles de maíz en dos localidades en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.5 (5): 883-891.

Tadeo-Robledo, M., A. Espinosa-Calderón, R. Guzmán-Máximo, A. Turrent-Fernández, J. Zaragoza-Esparza, J. Virgen-Vargas. 2015. Productividad de híbridos varietales de maíz de grano amarillo para Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana*. 26(1):65-72.

Tadeo R., M., A. Espinosa C., J. J. García Z., R. Lobato O., N. O. Gómez M., M. Sierra M., R. Valdivia B., B. Zamudio G., B. Martínez Y., C. López L., K. Y. Mora G., E. I. Canales I., A. L., Cárdenas M., J. Zaragoza E., H. J. Alcántar L. 2016. Tsiri Puma, híbrido de maíz para valles altos con esquema de androesterilidad para producción de semillas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 39: 331-333.

Vargas, M. and J. Crossa, 2000. The AMMI Analysis and Graphing the Biplot. *Biometrics and Statistical Unit, CIMMYT*. México. 42 p.

Vélez-Torres, M., J. J. García-Zavala, R. Lobato-Ortiz, I. Benítez-Riquelme, J. J. López-Reynoso, J. A. Mejía-Contreras, G. Esquivel-Esquivel. 2018. Estabilidad del rendimiento de cruzas dialélicas entre líneas de maíz de alta y baja aptitud combinatoria general. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 41: 167 – 175.

Yan, W.; A. Hunt; Q. Sheng and Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*. 40: 597-605.

Yan W., P. L. Cornelius, J. Crossa and L. A. Hunt. 2001. Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science*. 41:656-663.

Zobel, R. W., M. J. Wright, y H. G. Gauch. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*. 80: 388-393.

CAPÍTULO IV. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE ANDROESTERILIDAD CITOPLÁSMICA EN LÍNEAS Y CRUZAS SIMPLES DE MAÍZ DE LA UNAM E INIFAP

4.1 RESUMEN

La androesterilidad es la incapacidad que tienen las plantas para producir polen o polen viable. Este carácter es ampliamente utilizado en la producción de semillas en especies como maíz (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus*), sorgo (*Sorghum bicolor*), trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oriza sativa*), entre las más importantes. El objetivo de esta investigación fue identificar el tipo de esterilidad citoplásmica masculina (CMS) en los progenitores androestériles de los híbridos de maíz generados en la UNAM e INIFAP, por medio del uso de PCR con iniciadores específicos para las fuentes de esterilidad masculina C, T y S. Se utilizó semilla de 19 genotipos, entre ellos, líneas y cruas simples androestériles, progenitores de los híbridos generados en la UNAM e INIFAP. El método de extracción de DNA que se utilizó fue por medio de hexadeciltrimetilamonium bromide (CTAB) al 2% (Tris-HCl 100mM pH 8.0; EDTA 2H₂O mM; CTAB 2%; NaCl 1.4 M), establecido por Doyle y Doyle (1990), con ligeras modificaciones. El master mix para la reacción de PCR para cada muestra se preparó en un volumen final de 15 µL. Se utilizaron los iniciadores específicos para CMS: CMSCF, CMSCR, CMSTF, CMSTR, CMSSF y CMSSR, a una concentración de 10 µM. La reacción de PCR se llevó a cabo en un thermocycler peltier C1000 Touch. Los productos amplificados se verificaron por electroforesis horizontal en gel de agarosa, al 1.5% teñido con GelRed, el cual se corrió a 88 Volts durante 1.5 h. En la amplificación en el gel de agarosa de los productos obtenidos por medio de la PCR, se logró determinar que la fuente de esterilidad citoplásmica masculina de los 19 genotipos, progenitores de los híbridos de maíz generados en UNAM e INIFAP, pertenecen a la fuente “C” (Charrúa). Es necesario realizar pruebas de resistencia o susceptibilidad a *Bipolaris maydis* a los genotipos evaluados en esta investigación.

Palabras clave: *Zea mays* L., fuente de androesterilidad, *Bipolaris maydis*, mtDNA, PCR.

IDENTIFICATION OF THE TYPE OF CYTOPLASMIC MALE STERILE IN INBRED LINES AND SIMPLE CROSSES OF MAIZE OF THE UNAM AND THE INIFAP

4.2 ABSTRACT

Andro-sterility is the inability of plants to produce pollen or viable pollen. This character is widely used in the production of seeds in species such as corn (*Zea mays* L.), sunflower (*Helianthus annuus*), sorghum (*Sorghum bicolor*), wheat (*Triticum aestivum*), rice (*Oriza sativa*), among the most important. The objective of this research was to identify the type of male cytoplasmic sterility (CMS) in the andro-sterile parents of the hybrid maize developed in the UNAM and in the INIFAP by using PCR with specific primers for the sources of male sterility C, T and S. Seed of 19 genotypes was used, among them, inbred lines and andro-sterile single crosses, which are progenitors of the hybrids generated in the UNAM and in the INIFAP. The method of DNA extraction used was hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB) at 2% (100mM Tris-HCl pH 8.0, 2M EDTA m 2, CTAB 2%, 1.4M NaCl), established by Doyle and Doyle (1990), with slight modifications. The master mix for the PCR reaction for each sample was prepared in a final volume of 15 µL. The specific primers for CMS used were: CMSCF, CMSCR, CMSTF, CMSTR, CMSSF and CMSSR, at a concentration of 10 µM. The PCR reaction was carried out in a C1000 Touch thermocycler peltier. The amplified products were verified by horizontal electrophoresis in agarose gel, 1.5% dyed with GelRed, which was run at 88 Volts for 1.5 h. In the agarose gel amplification of the products obtained by means of the PCR it was determined that the source of male cytoplasmic sterility of the 19 genotypes, progenitors of the maize hybrids generated in the UNAM and in the INIFAP, belongs to the source "C" (Charrúa). It is necessary to perform resistance or susceptibility tests to *Bipolaris maydis* to the genotypes evaluated in this investigation.

Key words: *Zea mays* L., sources of male sterile, *Bipolaris maydis*, mtDNA, PCR.

4.3 INTRODUCCIÓN

La androestrilidad es la incapacidad que presentan las plantas de no producir granos de polen o bien al generar granos de polen, este no es viable o el polen no es funcional, sin afectar la fertilidad femenina (Huang *et al.*, 2012). La esterilidad masculina puede ser determinada por genes ubicados en el núcleo celular (esterilidad génica masculina), donde los genes que se encargan de la expresión de este carácter deben de encontrarse de forma recesiva (*cms/cms*); cuando la androesterilidad es

causada por genes que se encuentran en el citoplasma de la célula, se denomina esterilidad citoplásmica masculina, donde los genes que se encargan de la expresión de este carácter se ubican en el DNA mitocondrial (mtDNA), se identifica como citoplasma estéril, y citoplasma normal cuando no se presenta la androesterilidad. Otra forma en la que puede ocurrir la esterilidad masculina es por la combinación de las formas anteriores, es decir, por la presencia de genes recesivos *cms/cms*, y en la presencia de un citoplasma estéril (es el tipo de esterilidad masculina que presentan los genotipos utilizados en esta investigación).

La esterilidad citoplásmica masculina (CMS), o androesterilidad masculina, es un carácter de herencia materna, el cual es el resultado de reordenamientos en el mtDNA, donde se obtienen plantas incapaces de generar polen (Hanson y Bentolina, 2004; Chen y Liu, 2014; Horn y Gupta, 2014). Este carácter ha sido extensivamente explotado con éxito en la producción comercial de semillas híbridas y fitomejoramiento, como es el caso del maíz (*Zea mays* L.), evitando los inconvenientes de la emasculación manual o mecánica (Kaul, 1988; Kubo *et al.*, 2011; Touzet y Meyer, 2014).

Se han identificado tres tipos de esterilidad citoplásmica masculina (CMS) en maíz: CMS-T (Texas), CMS-S (USDA) y CMS-C (Charrúa). El citoplasma estéril masculino se distingue por genes nucleares específicos (genes *Rf*) que restauran la fertilidad del polen. Estos genes, restauradores de la fertilidad suprimen el efecto de esterilidad masculina, lo que permite la producción de polen viable en la generación F₁ de cruzamientos posteriores.

En la actualidad, la producción comercial de semillas híbridas de maíz se basa en la utilización de los tipos citoplasmáticos C y S, y otros mutantes generados por las empresas semilleras para su explotación comercial, del cual no se tiene identificada la fuente de esterilidad masculina, considerando que la fuente de CMS-T se utilizó ampliamente en 1950 y 1960, pero demostró ser extremadamente susceptible a *Bipolaris maydis*, que ocasionó una epifitía en gran parte de esta región. A consecuencia de este evento, la fuente CMS tipo T ha sido descartada en programas de mejoramiento. A finales de la década de los setentas y principios de la década de los ochentas, se encontraron nuevas fuentes de esterilidad masculina citoplasmática (CMS), como la CMS tipo C (Charrúa) y la CMS tipo S (USDA) (Beckett, 1971; Laughman y Gabay-Laughman, 1983; Levings, 1990).

Desde 1992, la UNAM e INIFAP trabajan en conjunto en la generación de nuevas variedades mejoradas de maíz utilizando progenitores androestériles, cuyo origen proviene de algunas

accesiones de la raza de maíz cónico, por lo que es imperativo conocer la fuente de esterilidad masculina de los progenitores femeninos de los híbridos generados en la UNAM e INIFAP, debido a que productores de semilla en los Valles Altos de México tienen la duda sobre la susceptibilidad de los progenitores a *Bipolaris maydis*, aunque en esta zona ecológica del país no se presentan las condiciones ambientales de la faja maicera de los Estados Unidos de América.

La forma de restaurar la fertilidad en los progenitores androestériles es utilizando machos con la capacidad restauradora de la fertilidad masculina, que contienen genes *Rf* nucleares que en la producción de semillas híbridas permiten tener un macho polinizador común.

El desarrollo y la aplicación de métodos moleculares son una importante herramienta auxiliar en los programas de mejoramiento genético, en este caso, permitió hacer un estudio preciso de las mutaciones responsables de la CMS, que se encuentran en el DNA mitocondrial (mtDNA) (Schnable y Wise, 1998). Se ha confirmado que los genes himéricos, partes de ADN con marcos de lectura abiertos (ORF) que comprenden secuencias derivadas de diferentes genes, son responsables de la esterilidad masculina citoplásmica. El gen T-urf13 se detectó en mtDNA CMS-T (Dewey *et al.*, 1986), el gen atp6-C en mtDNA CMS-C (Dewey *et al.*, 1991) y una región de ADN repetida "R" que contiene dos ORF en mtDNA CMS-S (Zabala *et al.*, 1997).

Se ha demostrado que el uso de PCR es un método rápido y confiable para identificación de los tipos de CMS, utilizando la combinación de tres pares de iniciadores en una sola reacción, lo cual, es conveniente para el análisis de un gran número de muestras (Liu *et al.*, 2002; Ignjatovic-Micic *et al.*, 2006). Se tiene el conocimiento del tamaño de los fragmentos específicos de DNA que se pretende identificar en la presente investigación, los cuales son de 398, 440 y 799 pares de bases (pb) de ADN para el citoplasma C, T y S, respectivamente.

Considerando lo anterior, en la presente investigación se planteó como objetivo identificar el tipo de fuente de la esterilidad citoplásmica masculina (CMS) en los progenitores androestériles de los híbridos generados en la UNAM e INIFAP, por medio del uso de PCR con iniciadores específicos para las fuentes de esterilidad masculina C, T y S.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS.

4.4.1 Material vegetal

Se utilizó semilla de 19 genotipos, entre ellos, líneas y cruza simples androestériles, de los cuales se ha verificado en campo que realmente mantengan la condición de androesterilidad a través de ambientes. Estos genotipos androestériles han sido utilizados como progenitores de los híbridos generados en los programas de mejoramiento de la UNAM e INIFAP. En el Cuadro 4.1 se presentan los genotipos androestériles de maíz.

Cuadro 4.1. Material genético utilizado para la identificación del tipo de androesterilidad citoplásmica en líneas y cruza simples de maíz de la UNAM e INIFAP.

Líneas	Cruzas simples	Híbrido trilineal
(IA442AE) 1	IA442AE X 524	(IA442AE X IA446) X 528
(IA442AE) 2	IA424AE X 525	(M56AE X IA239) X 527
(IA249AE)	IA249AE X MIA45	(M56AE X IA239) X 239
M56AE	IA424AE X IA249F1	
	IA424AE X IA249F2	
	IA442AE X 525 (1)	
	IA424AE X 525 (2)	
	IA442AE X IA446	
	IA442AE X IA239 (1)	
	IA442AE X IA239 (2)	
	IA249AE X M18	
	IA249AE X MIA46	

4.4.2 Extracción de DNA

El método de extracción de DNA que se utilizó fue por medio de hexadeciltrimetilamonium bromide (CTAB) al 2 % (Tris-HCl 100mM pH 8.0; EDTA 2H₂O mM; CTAB 2%; NaCl 1.4 M), establecido por Doyle y Doyle (1990), con ligeras modificaciones.

Se utilizaron plántulas de maíz, de donde se utilizó material vegetal de hoja para realizar la maceración del tejido con nitrógeno líquido. Posteriormente, se incubó en Baño María a 96 °C durante 60 min; se agitó cada 10 min y se centrifugó durante 10 min a 11,850 xg. El sobrenadante se transfirió a un tubo Eppendorf de 2 mL al que se añadió 1 mL de cloroformo-álcohol isoamílico (24:1); se agitó por inversión durante 10 min y se centrifugó por 10 min a 11,850 xg. El paso anterior se repitió agregándose 750 µL de cloroformo-álcohol isoamílico (24:1). El sobrenadante obtenido se colocó en un tubo Eppendorf de 1.5 mL, se agregaron 20 µL de acetato de sodio y 400 µL de etanol al 70%, previamente enfriado, y se incubó a -20 °C durante 120 min para precipitar el DNA.

Las muestras se centrifugaron a 11 850 xg durante 30 min, se decantó el sobrenadante y se recuperó el pellet, el cual se resuspendió con 400 µL de agua HPLC y se incubó a 70 °C durante 15 min; se agregaron 34 µL de acetato de sodio (NaOAc) 3M, más 1 mL de etanol al 95%, las muestras se incubaron a -20 °C durante 60 min.

Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 11,850 xg durante 10 min, se decantó el sobrenadante, se lavó el pellet con 650 µL de isopropanol al 70%, se centrifugó a 11 850 xg durante 10 min. Se realizaron dos lavados con isopropanol; las muestras se secaron durante 3 horas, y los pellets se resuspendieron con agua HPLC (de 30-100 µL según el tamaño del pellet).

Los productos de DNA se verificaron por espectrofotometría, en un NanoDrop 2000 UV-Vis (Thermo Scientific, EE.UU.). Solamente se emplearon muestras con valores de las relaciones A260/A280 y A260/A230 de 1.8 a 2.0 o ligeramente superiores a 2, para asegurar la integridad y calidad de DNA.

4.4.3 Amplificación mediante PCR.

El master mix para la reacción de PCR para cada muestra (1x) se preparó en un volumen final de 15 µL con 7.86 µL de agua HPLC, 3 µL de 5X PCR buffer, 0.6 µL de dNTPs (20 µM de cada uno), 0.18 µL de cada iniciador (CMSCF, CMSCR, CMSTF, CMSTR, CMSSF y CMSSR a una concebtración de 10 µM) (SIGMA, EE.UU.), 3 µL de DNA genómico (20 ng) y 0.18 µL (5U) de *GoTaq* DNA polimerasa (Promega, EE.UU.). Y se utilizó un mix de alta definición para probar la eficiencia de los iniciadores. Los tres pares de iniciadores específicos para esterilidad masculina citoplásmica C, T y S, fueron sintetizados de acuerdo a las secuencias de mtDNA utilizadas por Liu *et al.* (2002), y son las siguientes:

CMSCF: 5'-ATGCTAATGGTGTTCGATTCC-3'
 CMSCR: 5'-AGCATCATCCACATTCGCTAG-3'
 CMSTF: 5'-CATGAAATGGGTGAAGTCTCTTTC-3'
 CMSTR: 5'-AAGAGAAAGGGAGACTTTGGTCCC-3'
 CMSSF: 5'-CAACTTATTACGAGGCTGATGC-3'
 CMSSR: 5'-AGTTCGTCCCATATACCCGTAC-3'

Las regiones de mtDNA recombinante de los tipos de citoplasmas estériles C, T y S, y los sitios de unión de los iniciadores específicos son representados en la Figura 8.

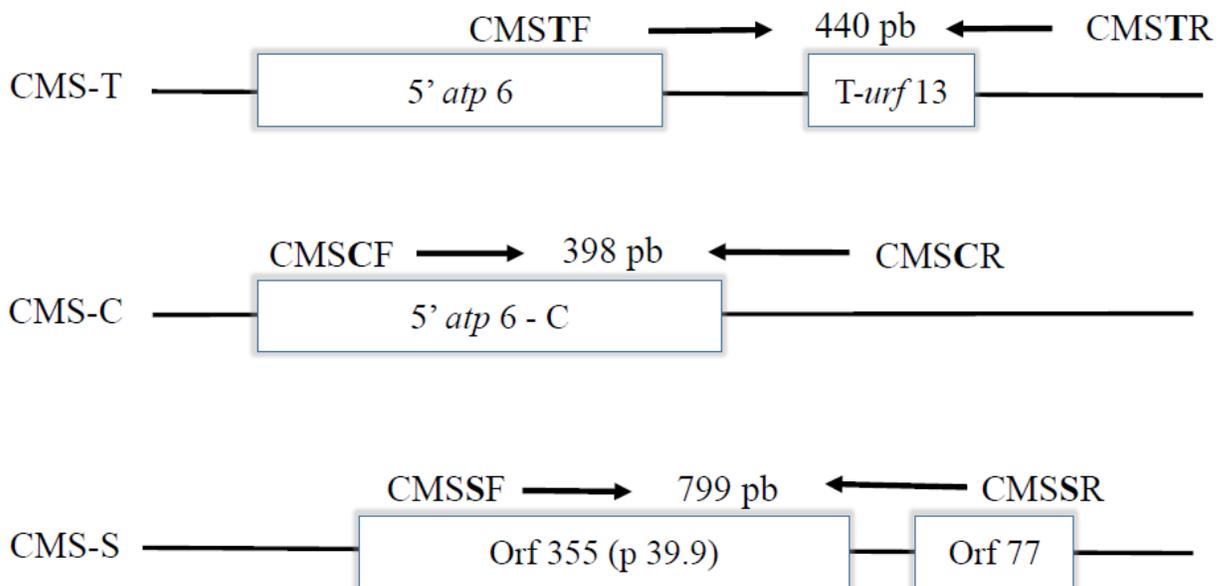


Figura 8. Regiones de mtDNA recombinante de los tipos CMS T, CMS C y CMS S, y los sitios de unión de los iniciadores específicos.

La reacción de PCR se llevó a cabo en un thermocycler Peltier C1000 Touch (BIO-RAD, EE.UU.). Las condiciones de amplificación de los fragmentos específicos fueron por medio del siguiente programa: un ciclo inicial de desnaturalización a 94 °C por 2 min, seguido de 35 ciclos a 94 °C por 1 min, 56 °C por 1 min, 72 °C por 1.30 min (35 ciclos), y un ciclo final de extensión a 72 °C por 5 min.

4.4.4 Electroforesis.

Los productos amplificados se verificaron por electroforesis horizontal en gel de agarosa (Seakem, EE. UU.), al 1.5 % teñido con GelRed (Biotium, EE. UU.), el cual se corrió a 88 Volts durante 1.5 h. Para la escalera de referencia del tamaño de los fragmentos amplificados, se utilizó el marcador 1 kb. Los geles se visualizaron en un transiluminador Infinity-3026 WL/LC/26MX (Vilber Lourmat, Alemania) con el software Infinity-Capt.

4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.5.1 Extracción de DNA

Se realizó de manera óptima la extracción de DNA, tomando tejido vegetal de hoja en plántulas de maíz, en los 19 genotipos androestériles evaluados, cuyos valores de absorbancia A260/A280 y A260/A230 estuvieron entre 1.8 y 2.2.

4.5.2 Amplificación por PCR

En la amplificación de los genes CMSC, CMST, y CMSS, se obtuvieron fragmentos de ~ 398 pares de bases (Figura 9). Donde se puede observar que el 100 por ciento de los genotipos evaluados pertenecen a la fuente de androesterilidad citoplásmica “C” (Charrúa). El origen de la fuente de esterilidad masculina de los genotipos utilizados en esta investigación, es de la raza nativa de maíz Cónico. La cual fue obtenida en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM).

Para realizar esta investigación se tomó como referencia los trabajos realizados por Liu *et al.* (2002), y Ignjatovic-Micic *et al.* (2006), donde indican que las condiciones para realizar PCR fueron las siguientes: 1. 94°C / 2 min; 2. 94°C / 1 min; 3. 55°C / 1 min; 4. 72°C / 1.30 min; y 5. 72°C / 5 min. Los pasos 2 y 4 se repitieron en 40 ciclos. Para poder obtener resultados, se tuvieron que modificar los ciclos de PCR a 35, así como ajustar la temperatura de alineamiento a 56°C, debido a que en las primeras pruebas no se obtuvieron los resultados esperados en la amplificación de fragmentos después de la electroforesis.

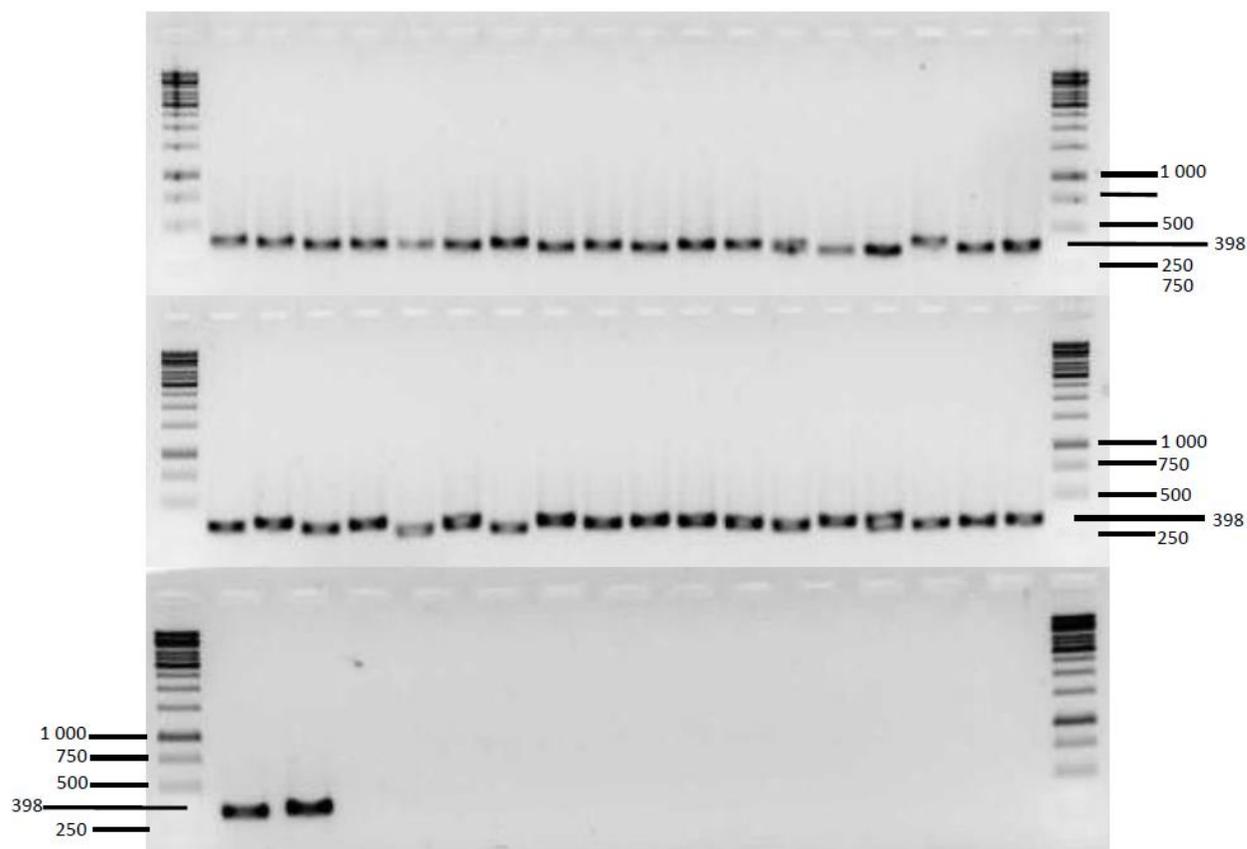


Figura 9. Productos de PCR observados en gel de agarosa al 1.5%. Bandas correspondientes a la amplificación parcial del gen.

4.6 CONCLUSIONES.

En la amplificación en el gel de agarosa de los productos obtenidos por medio de la PCR, se logró determinar que la fuente de esterilidad citoplasmica masculina de los 19 genotipos, progenitores de los híbridos de maíz generados en UNAM e INIFAP, pertenecen a la fuente “C” (Charrúa). Es necesario realizar pruebas de resistencia o susceptibilidad a *Bipolaris maydis* a los genotipos evaluados en esta investigación, para descartar cualquier problema fitosanitario en el incremento de semilla de los progenitores androestériles.

4.7 AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo es parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT: IT201618, UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

Carretera Cuautitlán - Teoloyucan, km 2.5. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. CP. 54714. AP. 25. Tel. 01 55 56231971.

Se reconoce el apoyo otorgado por el Laboratorio de Biotecnología y Patología de Semillas, a cargo de la Dra. Hilda Victoria Silva Rojas del Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Producción de Semillas del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

4.8 LITERATURA CITADA.

Beckett J. B. 1971. Classification of male-sterile cytoplasm in maize (*Zea mays* L.). *Crop Science*. 11: 724-727.

Chen, L., Liu Y-G. 2014. Male sterility and fertility restoration in crops. *Annual Reviews Plant Biology*. 65 (5): 5.1-5.28.

Dewey, R.E., C.S. Levings III, and D.H. Timothy. 1986. Novel recombinations in the maize mitochondrial genome produce a unique transcription unit in the Texas male sterile cytoplasm. *Cell*. 44:439-449.

Dewey, R.E., D.H. Timothy, and C.S. Levings III. 1991. Chimeric mitochondrial genes expressed in the C male sterile cytoplasm of maize. *Curr. Genet*. 20:475-482.

Hanson, M. R., and Bentolina S. 2004. Interactions of mitochondrial and nuclear genes that affect male gametophyte development. *Plan Cell*. 16: 154-169.

Doyle J. J., Doyle J. L. 1990. Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus* 12, 13-5.

Horn R., Gupta K. J., Colombo N. 2014. Mitochondrion role in molecular basis of cytoplasmic male sterility. *Mitochondrion*. 19: 198-205.

Huang, L., Xiang, J., Liu, J., Rong T. Wang J., Lu Y., Tang Q., Wen W., Cao M. 2012. Expression characterization of genes for CMS-C in maize. *Protoplasma*. 249: 1119.

Ignjatovic-Micic, D., Nikolic A., Mladenovic D. S., Vancetovic J. and Lazic-Jancic V. 2006. Identification of sterile cytoplasm using mtDNA primers. *GENETIKA* 3: 227-233.

Kaul, M.L.H. 1988. Male sterility in higher plants. Springer-Verlag, Berlin.

Kubo, T., Kitazaki, K., Matsunaga M., Kagami H., Mikami T. 2011. Male sterility-inducing mitochondrial genomes: how do they differ? *Critical Review in Plant Sciences*. 30 (4): 378-400.

Laughman, J. R. and S. J. Gabay-Laughman. 1983. Cytoplasmic males sterility in maize. *Annual Review of Genetics*. 17: 27-43.

Levings, C.S. III, and D.R. Pring. 1976. Restriction endonuclease analysis of mitochondrial DNA from normal and Texas cytoplasmic male sterile maize. *Science* 193:158–160.

Liu, Z., O. S. Peter, M. Long, U. Weingartner, P. Stamp and O. Kaeser. 2002. A PCR assay for rapid discrimination of sterile cytoplasm types in maize. *Crop Science*. 42: 566-569.

Schnable P. S. and R. P. Wise. 1998. The molecular basis of cytoplasmic male sterility and fertility restoration. *Trends in plant science*. 3: 175-180.

Touzet, P., Meyer E. H. 2014. Cytoplasmic male sterility and mitochondrial metabolism in plants. *Mitochondrion*. 19: 166-171.

USDA, Departamento de Agricultura de Estados Unidos. 2018. World Agricultural Supply and Demand Estimates Report. World Agricultural Outlook Board, Charing Agency.

Zabala, G., S.Gabay-Laughnan, and J.R. Laughnan. 1997. The nuclear gene Rf3 affects the expression of the mitochondrial chimeric sequence R implicated in S-type male sterility in maize. *Genetics*. 147:847–860.

DISCUSIÓN GENERAL

El problema que atraviesa el país en cuanto al abastecimiento de semillas mejoradas de maíz y otras especies de consumo básico por parte de la investigación pública, se remonta a un antecedente no muy lejano, en el año 2001, cuando se canceló la operación de la Productora Nacional de Semillas (PRONASE), concretándose su extinción con la Ley de Semillas (2007). Desde entonces, el apoyo a la investigación pública en maíz ha sido limitado y en ocasiones nulo. Se ha optado por darle apoyo económico por parte de las instituciones gubernamentales a programas como MASAGRO, a cargo del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), para que se abastezca de semillas a los agricultores que necesitan de semilla mejorada. Limitando apoyos a las instituciones de investigación pública como INIFAP, Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados, UNAM, UAAAN, entre otras, instituciones que cuentan con la capacidad de liderar programas de mejoramiento genético a nivel nacional, o regional, ya que son capaces de formar recursos humanos de calidad y generar tecnología para el país.

La formación del recurso humano en el Programa Doctoral de Genética tiene la finalidad de preparar estudiantes de calidad, con la capacidad de adquirir los conocimientos que necesitan los agricultores en condiciones reales, y de ser capaz de transmitir esos conocimientos adquiridos. El estudiante, además, adquiere las aptitudes, actitudes y sensibilidad necesarias para su desarrollo profesional, para conocer las condiciones, necesidades y posibles soluciones en el sector agrícola de la región que se trate en nuestro país. El egresado de este posgrado tiene la capacidad de ser crítico y de realizar análisis de las situaciones que se le presenten en el ámbito profesional.

Los presentes estudios se enfocan en el desarrollo del sector agrícola y agroalimentario de los Valles Altos de México, en particular, en la cadena productiva del maíz, ya que una de las metas en la entidad federativa, región de estudio, y a nivel nacional es la autosuficiencia alimentaria, y para poder lograrlo hay que apoyar al sector agrícola de la región, generando variedades de maíz que estén disponibles para las condiciones ambientales específicas de cada agricultor; y para que cada agricultor pueda incrementar sus rendimientos debe tener disponibles los recursos genéticos adecuados, es decir, variedades e híbridos, utilizando como base los recursos fitogenéticos nativos, que se deben conservar adecuadamente para seguirlos aprovechando de manera eficiente y

sustentable, sabiendo que el agricultor es el principal administrador de los recursos genéticos, del maíz y otras especies nativas que son aprovechadas para consumo humano.

El presente estudio contribuye a la generación de nuevas tecnologías para los agricultores, productores de grano y productores de semillas de maíz de los Valles Altos de México. Dicha tecnología son las variedades mejoradas de maíz con características agronómicas favorables para los agricultores, como variedades de ciclo corto e intermedio, resistentes al acame, altura de planta y de mazorca favorables para la cosecha mecánica, producidas usando la androesterilidad para disminuir costos de producción y de venta de la semilla. La meta es poder incrementar la media del rendimiento de grano a nivel estatal o regional con la adopción por los agricultores de las nuevas variedades mejoradas de maíz, esto de manera gradual. Con el incremento del rendimiento y la compra de semilla de híbridos a precio accesible, el agricultor tendrá menos necesidad de comprar grano para su hogar y podrá vender los excedentes.

El principal problema que atraviesan las instituciones de investigación pública dedicadas a la generación de nuevas tecnologías, en la actualidad es la falta y reducción del presupuesto económico para poder realizar actividades como difusión de los eventos que realizan las instituciones, y la transferencia de tecnología. Los productos que genera la investigación pública es de muy buena calidad, el problema es que no hay forma de hacerlo llegar a los consumidores finales, que son los agricultores, es urgente contar con semilla de progenitores de los nuevos híbridos y promover microempresas de semillas para abastecimiento de ellas y corregir la distorsión en semillas.

La UNAM e INIFAP presentan situaciones complejas, como es poder llegar a competir con las grandes empresas, los grandes monopolios que dominan el mercado de semillas del país, estas instituciones no cuentan con la logística para establecer una campaña mercadotécnica, como lo hacen las empresas semilleras nacionales y transnacionales, pero sí se tiene la conciencia y el conocimiento para generar y producir semillas altamente productivas con un enfoque de conservación sustentable de los recursos genéticos del país.

En México, por parte de las instituciones de investigación pública se tienen pocas referencias de trabajos con androesterilidad y restauración de la fertilidad masculina en el cultivo de maíz, más que el trabajo de Mendoza *et al.* (2006), y mucho menos que generen variedades mejoradas de maíz. Se sabe y se conoce que las empresas privadas generan del 80 al 90% de sus variedades utilizando progenitores androestériles, pero su objetivo no es publicar o dar a conocer las características de sus progenitores. El hecho de tener las herramientas de esterilidad citoplásmica masculina y restauración de la fertilidad masculina en sus progenitores femeninos y masculinos (Tadeo *et al.*, 2016; Espinosa *et al.*, 2018), respectivamente, nos permite desarrollar sistemas de producción de semilla eficiente y de calidad. Lo anterior se puede replicar por los agricultores formando pequeños grupos o asociaciones de producción de semilla para comercializar a nivel local la semilla que llegaran a producir, a menor precio que las empresas semilleras transnacionales. Consecuentemente, en esta actividad es donde uno como profesionista puede participar en la asistencia técnica y en la capacitación de los agricultores para que produzcan su propia semilla.

En esta investigación se puede apreciar la importancia del trabajo interinstitucional en equipo, donde cada uno de los integrantes del Consejo Particular aporta de manera muy significativa sus conocimientos y experiencia sobre los temas que se abordaron en este documento.

Al concluir esta investigación, se pretende continuar promocionando las variedades mejoradas que se evaluaron en éste trabajo y las que están en proceso de liberación comercial para su adopción en los Valles Altos de México, con la finalidad de llegar a la autosuficiencia agrícola en la producción de este grano básico para la alimentación de la población, y los diferentes usos que el maíz tiene en nuestro país (maíz pozolero, elotero, para la elaboración de totopos, para producir grano y semilla, inclusive forrajero).

CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con las diferentes investigaciones que se llevaron con híbridos experimentales de progenitores androestériles y con restauración de la fertilidad masculina, se pueden establecer las siguientes conclusiones generales:

En el estudio de androesterilidad y capacidad de la restauración de la fertilidad masculina, la productividad de grano y semillas en líneas e híbridos de maíz, en los experimentos establecidos en los ciclos primavera-verano 2013, 2014 y 2015 se concluye que los genotipos experimentales que utilizaron el macho restaurador de la fertilidad MIA44 R en la conformación del híbrido final (IA446FXIA442F) X MIA44 R, (IA424FXIA249) X MIA44 R, (IA442AECXIA249) X MIA44 R, y (IA424AECXIA249) X MIA44 R presentaron rendimientos similares a los de los híbridos comerciales Tsíri Puma y H-50, que rindieron 6430 y 6397 kg ha⁻¹, respectivamente. Los niveles de productividad mostrados por los híbridos experimentales apoyarían su liberación comercial por su buena competitividad en relación con los testigos. Para esta línea macho restauradora de la fertilidad (MIA44 R), se confirmó su capacidad restauradora de la fertilidad por completo en las cruzas donde participó, por lo que puede señalarse que dicha capacidad en esta línea es genéticamente estable.

Los genotipos con menores efectos de interacción GE y que se consideraron los más estables por el método AMMI fueron el híbrido con fertilidad restaurada (IA424AEC X M18) X MIA44 R y el H-51 AE, con rendimientos inferiores a la media general del estudio, pero mayores a la media nacional (3 600 hg ha⁻¹). El mejor ambiente de prueba para este modelo fue FESC-UNAM 2015 por sus bajos valores de CP1, y su rendimiento medio mayor a la media general de la investigación.

El modelo SREG identificó a los híbridos H-50, Tsíri Puma, (IA446F X IA442F) X MIA44 R, y H-51 AE como los más estables y con adaptación específica en los ambientes FESC-UNAM 2014 (3) y CEVAMEX 2014 (4), los cuales conformaron de manera espacial en el GGE biplot SREG, el mega-ambiente más grande en este análisis.

Ambos modelos son complementarios para el estudio de la interacción GE y la determinación de genotipos estables, pues ambos presentan herramientas sencillas para poder interpretar de una manera eficiente la interacción de los genotipos en los ambientes de prueba. El modelo AMMI es más eficiente para explicar la interacción GE, y para definir a los genotipos estables. El modelo

SREG hace un agrupamiento en mega-ambientes de los ambientes de prueba, lo cual facilita definir los genotipos con adaptación en ambientes específicos.

En la investigación para determinar la productividad de híbridos de maíz fértiles y androestériles con restauración de fertilidad en Valles Altos de México, en los experimentos establecidos en el ciclo primavera-verano 2016, se concluye que los mejores rendimientos correspondieron a híbridos con fertilidad restaurada CSRM X MIA46 y Atziri Puma, que superaron a los testigos comerciales, sin capacidad restauradora de la fertilidad masculina, lo que los señala con perspectivas favorables de uso comercial. El ambiente de FES Cuautitlán, UNAM tuvo mayor productividad, en comparación con la localidad CEVAMEX, INIFAP en sus dos fechas de siembra.

En el estudio de estabilidad del rendimiento en híbridos de maíz con restauración de fertilidad masculina en Valles Altos, se definió que los genotipos con menores efectos de interacción GE por sus valores del componente principal 1 fueron el Tlaoli Puma 4, Atziri Puma y CSRM X MIA46. El híbrido que se consideró más estable por el método AMMI fue el híbrido con fertilidad restaurada Tlaoli Puma 4.

En la investigación para definir la identificación del tipo de androesterilidad citoplásmica en líneas y cruza simples de maíz de la UNAM e INIFAP, de acuerdo con las actividades realizadas en el laboratorio de Biotecnología y Patología de Semillas, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, mediante la amplificación del gel de agarosa de los productos obtenidos de la PCR, se logró determinar que la fuente de esterilidad citoplásmica masculina de los 19 genotipos progenitores de los híbridos de maíz generados en UNAM e INIFAP, pertenecen a la fuente “C” (Charrúa). Es necesario realizar pruebas de resistencia o susceptibilidad a *Bipolaris maydis* a los genotipos evaluados en esta investigación, para descartar cualquier problema fitosanitario en el incremento de semilla de los progenitores androestériles.

LITERATURA GENERAL CITADA

Ba, Q., G. Zhang, N. Niu, S. Ma, J. Wang. 2014. Cytoplasmic effects on DNA methylation between male sterile lines and the maintainer in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Gene*. 549: 192-197.

Cisneros L. M. E., L. E. Mendoza O., V. A. González H. 2012. Male parent effects on stigma receptivity and seed set of sorghum A-lines under chilling field temperatures. *Plant breeding*. 131: 88-93.

Donnet, L., D. López, J. Arista, F. Carrión, V. Hernández, A. González. 2012. El potencial de mercado de semillas mejoradas de maíz en México. Mexico. CIMMYT.

Ebehart, S., A. and W. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 6:36-40.

Espinosa-Calderón, Alejandro; Tadeo-Robledo, Margarita, Sierra-Macías, Mauro; Turrent-Fernández, Antonio; Valdivia-Bernal, Roberto; Zamudio-González, Benjamín. 2009 a. Rendimiento de híbridos de maíz bajo diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en México. *Agronomía Mesoamericana*, Vol. 20 (2): 211-216.

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-Calderón A., M. Tadeo-Robledo, B. Zamudio-González, J. Virgen-Vargas, A. Turrent-Fernández, I. Rojas-Martínez, N. Gómez-Montiel, M. Sierra-Macías, C. López-López, A. Palafox-Caballero, G. Vázquez-Carrillo, F. Rodríguez-Montalvo, E. I. Canales-Islas, J. A. Zaragoza-Esparza, B. Martínez-Yañez, R. Valdivia-Bernal, A. L. Cárdenas-Marcelo, K. Y. Mora-García y B. Martínez-Nuñez. 2018. H-47 AE, Híbrido de maíz para Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 41 (1): 87 – 89.

Finlay, K. W, and G. N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in plant breeding programme. *Austr. J. Agric. Res.* 14: 742-754.

Hohls, T. 2001. Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environmental stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica* 120: 235-245.

Luna, M., M. A. Hinojosa R., Ó. J. Ayala G., F. Castillo G. y J. A. Mejía C. 2012. Perspectivas de desarrollo de la industria semillera de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:1-7.

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.

Martínez-Lázaro, C., L. E. Mendoza-Onofre, G. García de los Santos, M. C. Mendoza Castillo, A. Martínez-Garza. 2006. Rendimiento de grano de híbridos isogénicos de maíz formados mediante androesterilidad vs. desespigamiento. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 29(4): 365-368

Mendoza, V. R., M. H. Reyes V., C. Espinosa Z., J. A. Villareal Q. 2006. Viabilidad de polen de una línea de girasol cultivado, en el girasol silvestre (*Helianthus annuus* L. SSP. *Texanus* Heiser) y en su descendencia híbrida. *Acta Botánica Mexicana*. 76: 47-57.

Tadeo, R. M. y Espinosa, C. A. 2003. Microempresas de semillas con híbridos “PUMAS de maíz” alternativa para abastecimiento en México. *Revista FESC. Divulgación Científica Multidisciplinaria*. 3(8):5-10.

Tadeo, R. M., Espinosa C., A., Solano A. M. y Martínez 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., Beck L. D., Torres, J. L. 2007. Rendimiento de semilla de cruza simples fértiles y androestériles progenitoras de híbridos de maíz. *Agricultura Técnica en México*. 33 (2): 175-180.

Tadeo R., M., Espinosa C., A., Serrano R., J., Sierra M., M., Caballero H., F., Valdivia B., R., Gómez M., N., Palafox C., A., Rodríguez M., F. A., Zamudio G., B. 2010. Productividad de

diferentes combinaciones de semilla androestéril y fértil en dos híbridos de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1 (3 y 1): 273-287.

Tadeo-Robledo Margarita, Alejandro Espinosa-Calderón§, Antonio Turrent-Fernández, Benjamín Zamudio-González, Mauro Sierra-Macías, Noel Gómez-Montiel, Roberto Valdivia-Bernal y Juan Virgen-Vargas. 2014. Rendimiento de híbridos androestériles y fértiles de maíz en dos localidades en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.5 (5): 883-891.

Tadeo R., M., A. Espinosa C., J. J. García Z., R. Lobato O., N. O. Gómez M., M. Sierra M., R. Valdivia B., B. Zamudio G., B. Martínez Y., C. López L., K. Y. Mora G., E. I. Canales I., A. L. Cárdenas M., J. Zaragoza E., H. J. Alcántar L. 2016. Tsiri Puma, híbrido de maíz para valles altos con esquema de androesterilidad para producción de semillas. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 39: 331-333.

Turrent F A. 1994. Plan de investigación del Sistema maíz-tortilla en la región Centro. CIRCE, INIFAP, SARH, Publicación Especial No. 12, Chapingo, México.

USDA, Departamento de Agricultura de Estados Unidos. 2018. World Agricultural Supply and Demand Estimates Report. World Agricultural Outlook Board, Charing Agency.

SIAP – SAGARPA. 2018. <https://www.gob.mx/siap>

SNICS – SAGARPA. 2018. <https://www.gob.mx/snics>