



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

PRODUCCIÓN DE SEMILLAS

**ANÁLISIS GENÉTICO DE LA CALIDAD DE SEMILLA Y DEL
RENDIMIENTO DE GRANO DE HÍBRIDOS SIMPLES Y
TRILINEALES Y SUS PROGENITORES EN SORGOS TOLERANTES
AL FRÍO**

MARISOL GALICIA JUÁREZ

T E S I S

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

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

DICIEMBRE 2016

La presente tesis titulada: **Análisis genético de la calidad de semilla y del rendimiento de grano de híbridos simples y trilineales y sus progenitores en sorgos tolerantes al frío**, realizada por la alumna: **Marisol Galicia Juárez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

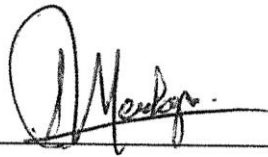
DOCTORA EN CIENCIAS

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

PRODUCCIÓN DE SEMILLAS

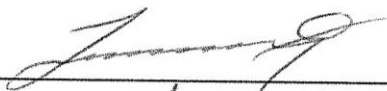
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



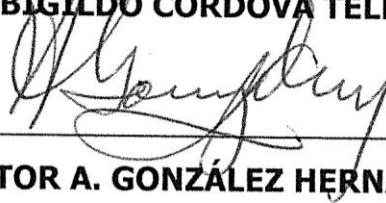
DR. LEOPOLDO E. MENDOZA ONOFRE

ASESOR



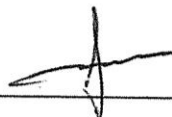
DR. LEOBIGILDO CÓRDOVA TÉLLEZ

ASESOR



DR. VÍCTOR A. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

ASESOR



DRA. MA. EUGENIA CISNEROS LÓPEZ

ASESOR



DR. IGNACIO BENÍTEZ RIQUELME

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2016.

ANÁLISIS GENÉTICO DE LA CALIDAD DE SEMILLA Y DEL RENDIMIENTO DE
GRANO DE HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES Y SUS PROGENITORES EN
SORGOS TOLERANTES AL FRÍO

Marisol Galicia Juárez, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2016

RESUMEN

El desarrollo de líneas A, B y R, y la generación de híbridos simples y trilineales de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) tolerantes al frío pueden generar alternativas a los sistemas de producción agrícola de los Valles Altos Centrales de México. Se establecieron dos experimentos, con los siguientes objetivos; 1) Comparar la heterosis media y superior, la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de variables relacionadas con la germinación de la semilla y el vigor de plántulas en condiciones de cama de arena; y 2) Evaluar su comportamiento genético y agronómico en condiciones de campo. En la cama de arena las líneas R presentaron mejores atributos de calidad fisiológica de la semilla que las líneas B. La heterosis media de ambos tipos de híbridos no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en variable alguna; en cambio, la heterosis superior fue mayor en los híbridos simples para porcentaje de plántulas normales, peso seco de plántula y velocidad de emergencia. La línea A2 y el probador R14 presentaron los valores más altos de ACG y ACE en ambos tipos de híbridos. En el experimento de campo, no hubo diferencias ($p > 0.05$) para peso de semillas por panoja y número de semillas por panoja entre la media del grupo de líneas R y la media del grupo de híbridos simples y trilineales. La heterosis media y superior fue de magnitud semejante entre ambos tipos de híbridos. La línea androestéril A1 y la línea restauradora R17 presentaron los valores más altos de ACG para rendimiento tanto en híbridos simples como en trilineales.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* L. Moench; aptitud combinatoria; heterosis; híbridos simples; híbridos trilineales; sorgo.

GENETIC ANALYSIS OF SEED QUALITY AND GRAIN YIELD OF SINGLE AND
THREE-WAY COLD TOLERANT SORGHUM HYBRIDS AND ITS PARENTAL LINES

Marisol Galicia Juárez, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2016

ABSTRACT

The development of cold tolerant A_, B_ and R_ lines, and their corresponding single and three-way hybrids can generate alternatives to agricultural production systems of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in the Mexican Highlands. Two experiments were established with the following objectives; 1) To compare heterosis and high parent heterosis, general (GCA) and specific combining ability (ACE) for traits related to seed germination and seedling vigor under sand bed conditions; and 2) To assess their genetic and agronomic performance under field conditions. In the sand bed test, R_ lines showed better physiological seed quality attributes than the B_lines. Heterosis of both types of hybrids showed non significant differences ($p > 0.05$) for any trait; however, high parent heterosis of single hybrids was higher for percentage of normal seedlings, seedling dry weight and emergence rate. The A2 line and the R14 tester showed the highest values of GCA and SCA in both types of hybrids. In the field experiment, there were non significant differences ($p > 0.05$) for panicle seed weight and number of seeds per panicle among the mean of the R_lines group and that of the single and three-way hybrids. Heterosis and high parent heterosis was of similar magnitude between the two types of hybrids. The male-sterile A1_line and the R17 restorer line showed the highest values of GCA for seed yield in both single and three-way hybrids.

Key words: *Sorghum bicolor* L. Moench; combining ability; heterosis; single hybrids; three-way hybrids; sorghum.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para cursar mis estudios de doctorado.

Al Colegio de Postgraduados, muy especialmente al Programa de Producción de Semillas, por formarme como profesionista.

A los miembros de mi Consejo Particular:

Dr. Leopoldo E. Mendoza Onofre
Dra. Ma. Eugenia Cisneros López
Dr. Víctor A. González Hernández
Dr. Leobigildo Córdoba Téllez
Dr. Ignacio Benítez Riquelme
† Dr. Porfirio Ramírez Vallejo

Por el papel tan importante que han tenido en mi formación académica, así como la dirección, apoyo y dedicación en la realización de esta investigación, por sus consejos y enseñanzas compartidas, gracias.

A mis colegas Cesar Rebollar Ávila y Eduardo E. Domínguez Caballero por su apoyo y amistad.

Al personal administrativo y de campo del CP por el apoyo y facilidades durante mi estancia en esta institución.

DEDICATORIA

A Dios por regalarme la vida, por siempre estar a mi lado, cuidarme y guiarme en este camino llamado vida, te amo.

A mis padres: María Hipólita Juárez Martínez y Flor Raymundo Galicia Ortiz por todo el amor, creer en mí y en mis sueños, brindándome su apoyo incondicional siempre.

Muy especialmente para ti, mi princesa: Zaira Priscilla, que llenas e iluminas todos mis espacios con tu amor, por ser mi fuerza y mayor motivación del día a día.

A mis hermanas: Guadalupe, Leticia y Liliana y hermano Francisco, por ser mis grandes ejemplos de lucha, fuerza y consistencia para poder cumplir nuestros objetivos, además de todo su amor y apoyo en todo momento.

A mi cuñada: Rosario y cuñados: Manuel, Alan, Edgar y sobrinos: Susana Jazmín, José Ángel, David Uriel, Citlalli Itzel, Anahí, Rodrigo y Santiago, por siempre dar enseñanzas de vida y ser unos ángeles que iluminan y motivan a ser mejor cada día.

A Valentín Guerrero Huerta, María Guadalupe Cándido Hernández y Valentín Guerrero Cándido por todo el cariño y apoyo incondicional brindado siempre.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
REVISIÓN DE LITERATURA	2
1. Panorama de la producción de sorgo.....	2
2. Antecedentes de líneas progenitoras e híbridos simples tolerantes al frío.....	3
3. Calidad fisiológica de la semilla de genotipos tolerantes al frío.....	6
4. Híbridos simples vs. híbridos trilineales.....	7
OBJETIVOS GENERALES	9
HIPÓTESIS GENERALES	9
LITERATURA CITADA	9
CAPÍTULO I. HETEROSIS AND COMBINING ABILITY OF SEED PHYSIOLOGICAL QUALITY TRAITS OF SINGLE CROSS VS. THREE- WAY SORGHUM HYBRIDS	12
I.1 ABSTRACT.....	12
I.2 INTRODUCTION.....	13
I.3 MATERIALS AND METHODS.....	15
I.3.1 Seedling emergence test.....	16
I.3.2 Statistical analyses.....	17
I.4 RESULTS AND DISCUSSION.....	18
I.4.1 Comparisons of groups of genotypes.....	18
I.4.2 Heterosis.....	20
I.4.3 General and specific combining ability.....	22
Lines and testers in single cross hybrids.....	22
Lines and testers in three-way hybrids.....	22
I.4.4 Maternal vs. paternal effects in the non isogenic female cross of three-way hybrids.....	22
I.5 CONCLUSION.....	25
I.6 ACKNOWLEDGEMENTS.....	25
I.7 REFERENCES.....	25

	Página
CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO GENÉTICO Y AGRONÓMICO DE HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES DE SORGOS TOLERANTES AL FRÍO	29
II.1 RESUMEN.....	29
II.2 ABSTRACT.....	30
II.3 INTRODUCCIÓN.....	30
II.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
II.4.1 Variables.....	33
II.4.2 Análisis estadísticos.....	34
II.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
II.5.1 Comparaciones entre ambientes.....	37
II.5.2 Comparaciones entre grupos.....	37
II.5.3 Comparaciones de genotipos dentro de cada grupo.....	39
II.5.4 Comparaciones de los híbridos simples y trilineales dentro de cada grupo...	40
II.5.5. Correlaciones.....	42
II.5.6 Aptitud combinatoria general y específica.....	42
II.5.7. Heterosis.....	45
II.6 CONCLUSIONES.....	46
II.7 LITERATURA CITADA.....	47
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN FENOTÍPICA DE LÍNEAS MANTENEDORAS (LÍNEAS B) DE SORGO GRANÍFERO TOLERANTES AL FRÍO	51
BIBLIOGRAFÍA.....	55
CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN FENOTÍPICA DE LÍNEAS RESTAURADORAS (LÍNEAS R) DE SORGO GRANÍFERO TOLERANTES AL FRÍO	58
BIBLIOGRAFÍA.....	63
CONCLUSIONES GENERALES	65

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

CAPÍTULO I		Página
Table I.1	Square means and significance of the source of variation of the groups of genotypes for seed physiological quality traits.....	18
Table I.2	Means of seed physiological quality traits for each group of sorghum genotypes.....	19
Table I.3	Values of heterosis and heterobeltiosis for seed physiological quality traits for single cross and three-way sorghum hybrids.....	20
Table I.4	Estimated values of general and specific combining ability (GCA and SCA) for seed physiological quality traits of female and male lines in single cross hybrids.....	23
Table I.5	Estimated values of general and specific combining ability (GCA and SCA) for seed physiological quality traits of female and male lines in three-way hybrids.....	24
Figure I.1	Diallel scheme of isogenic and non isogenic AxB crosses. Isogenic crosses (boxes in white); non isogenic crosses (boxes in grey). Non isogenic crosses to analyze maternal effects of the A1 line (bold letters) and paternal effects of the B1 line (italics letters).....	15
CAPÍTULO II		
Cuadro II.1	Cuadrados medios del ANAVA combinado para las variables registradas en campo.....	36
Cuadro II.2	Comparación de medias por ambiente, grupos y líneas progenitoras dentro de grupos de ambos ambientes.....	38
Cuadro II.3	Comparación de medias de híbridos simples y trilineales dentro de grupos	41
Cuadro II.4	Coefficientes de correlación de Pearson para peso de semillas por panoja en híbridos simples y trilineales.....	42
Cuadro II.5	Cuadrados medios de los ANAVA combinados de líneas y probadores en las variables evaluadas en híbridos simples.....	43
Cuadro II.6	Aptitud combinatoria general de líneas y probadores en híbridos simples, promedio de riego y temporal.....	44

Cuadro II.7	Estimaciones de heterosis media y superior de los híbridos simples vs. híbridos trilineales para las variables agronómicas estudiadas.....	45
-------------	--	----

CAPÍTULO III

Cuadro III. 1	VARIABLES MORFOLÓGICAS DEL GRUPO DE LÍNEAS CP-TF B. DATOS PROMEDIO DE DOS AMBIENTES.....	53
Figura III.1	Panojas representativas de las líneas mantenedoras de sorgo tolerantes al frío.....	55

CAPÍTULO IV

Cuadro IV.1	VARIABLES MORFOLÓGICAS DE LAS LÍNEAS RESTAURADORAS. DATOS PROMEDIO DE DOS AMBIENTES.....	61
Figura IV.1	Panojas representativas de las líneas restauradoras de sorgo tolerantes al frío.....	62

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los Valles Altos Centrales de México (cerca de 1.5 millones de hectáreas) comprenden áreas agrícolas que se ubican entre 1800 y 2300 msnm, en las que prevalecen temperaturas mínimas cercanas a 8 °C durante la estación de crecimiento de las especies anuales (Osuna *et al.*, 2000). En esta región no existen siembras comerciales de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) pues las variedades e híbridos disponibles están adaptadas a las condiciones tropicales y subtropicales del país; en consecuencia no producen grano ya que las bajas temperaturas causan androesterilidad ecológica (Livera y Carballo, 1985). Esta situación prevalece a pesar de que en el entonces Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas se generaron tres variedades de sorgo granífero (VA-110, VA-120 y VA-130) adaptadas a esa región (Romo y Carballo, 1980). El principal criterio agronómico de tolerancia al frío (TF) que se ha adoptado en los programas de mejoramiento genético ha sido el porcentaje de grano en panojas autofecundadas.

Con el propósito de llevar a cabo un proyecto de desarrollo de híbridos de sorgo tolerantes al frío en el Colegio de Postgraduados (CP), se generaron líneas mantenedoras (líneas B) y líneas restauradoras (líneas R) adaptadas a esas condiciones ecológicas (Mendoza-Onofre, 1992). Con esas líneas se formaron los primeros híbridos de sorgo tolerantes al frío, a los que se designó como híbridos de “primera generación” (Osuna-Ortega *et al.*, 2001, 2003). En una etapa posterior se desarrollaron nuevas líneas B y R con las cuales se generó a los híbridos de “segunda generación” (León-Velasco *et al.*, 2009).

En las evaluaciones de campo se observó que los híbridos experimentales presentaban un lento crecimiento de plántulas en comparación con el maíz (*Zea mays* L.). Al respecto se planteó la hipótesis de que el menor vigor de las plántulas de sorgo se debía al reducido tamaño de su semilla, lo cual fue descartado por Valadez-Gutiérrez *et al.* (2006, 2007). Otra hipótesis que se planteó fue la de considerar que el vigor de plántula de la F1 de un híbrido trilineal

[(AxB) x R] es mayor que el de la plántula F1 de una cruce simple (híbrido AxR). Esta hipótesis requería las comparaciones entre las características agronómicas y genéticas de híbridos simples y de híbridos trilineales en sorgo, de lo cual no existen antecedentes en México.

De manera paralela, ante la posibilidad de que los resultados del programa de mejoramiento genético conducido en el CP escalen a nivel comercial, se consideró indispensable inscribir a un grupo de líneas B y R sobresalientes en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales del Sistema Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), así como solicitar los Títulos de Obtentor respectivos.

REVISIÓN DE LITERATURA

1. Panorama de la producción de sorgo

El sorgo es el quinto cereal en el mundo por su producción y superficie cosechada. El principal país productor es Estados Unidos de América y México se ha mantenido en el segundo lugar desde el año 2010 (Bond *et al.*, 2014).

La producción mundial de sorgo granífero ha aumentado en los últimos dos años, debido al alto consumo de sorgo en China, que es el primer importador (FIRA, 2015).

En Asia y África, donde las condiciones climáticas más adversas y su capacidad tecnológica es menor que en América, la mayor parte del grano del sorgo se destina al consumo humano, mientras que países con mejores condiciones climáticas y con mayor capacidad tecnológica lo destinan al consumo animal o de la industria (Bond *et al.*, 2015; Hawkes, 2015).

En México la producción de sorgo creció 33 % de 2013 a 2014, debido al incremento en el rendimiento por hectárea. Los principales estados productores son Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa y Michoacán (SIAP-SAGARPA, 2016), los cuales se ubican en las regiones subtropicales del país. Sin embargo, la presencia reciente del pulgón amarillo

(*Melanaphis sacchari*) ha reducido tanto los rendimientos como la superficie sembrada en porcentajes estimados de 30 % en Guanajuato, Morelos, Jalisco y Michoacán en el ciclo PV 2016.

En los Valles Altos Centrales de México, que comprenden cerca de 1.5 millones de hectáreas, no se siembra sorgo pues los híbridos adaptados a las regiones subtropicales no producen grano en ambientes “fríos” donde prevalecen temperaturas cercanas a 8 ° C durante los meses comprendidos entre marzo y octubre periodo que corresponde a la estación de crecimiento de los cultivos agrícolas. Incrementar la superficie de siembra es una opción para aumentar la producción de sorgo, por lo que el desarrollo de líneas A, B y R, y la generación de híbridos tolerantes al frío (que produzcan grano en panojas autofecundadas al sembrarlas en lugares con climas similares al de Chapingo, México) puede generar alternativas a los sistemas de producción agrícola de los Valles Altos que incluye los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, México y algunos municipios de Morelos.

2. Antecedentes de líneas progenitoras e híbridos simples tolerantes al frío

El mejoramiento por hibridación en sorgo implica la derivación y evaluación de líneas A, B y R, así como identificar las mejores líneas progenitoras para formar híbridos de sorgo potencialmente superiores adaptados a una región específica, para lo cual se requiere su evaluación en ambientes representativos de la variabilidad ambiental de la región o en las regiones de influencia del programa de mejoramiento.

La primera generación de híbridos de sorgo TF se evaluó en el año 1990 en condiciones de riego. El rendimiento de grano del grupo de esos híbridos superó en 10 % el rendimiento de los progenitores masculinos (líneas R) y en 30 % a los progenitores femeninos (líneas B), con un promedio de heterosis media de 20 %. Las líneas R fueron 20 % mejor en rendimiento de

grano que las líneas B. Algunos híbridos mostraron rendimiento similar al de VA-110; sin embargo, sus atributos agronómicos fueron mejores, ya que el color de grano era claro, con bajo contenido de taninos, altura de planta uniforme y similar precocidad (días a la antesis y días para la madurez fisiológica de grano) (Mendoza-Onofre, 1992).

En el año 1993 se seleccionaron tres pares de líneas A y B y cuatro líneas R tolerantes al frío de la primera generación, con las que se formaron 12 híbridos que se evaluaron en los Valles Altos Centrales de México, en Celaya, Guanajuato y en Río Bravo, Tamaulipas, con el propósito de medir el potencial del germoplasma de sorgo tolerante al frío en la adaptación y adaptabilidad a variaciones ambientales, así como contribuir al conocimiento de la genética y la fisiología de la tolerancia al frío en sorgo. En Valles Altos, el rendimiento del grupo de híbridos, en promedio de tres ambientes (Montecillos: riego y temporal; Tecámac: riego) fue 4592 kg ha⁻¹, mientras que el de sus progenitores B fue 3359 y 3847 kg ha⁻¹ para el grupo de las líneas R. El promedio de días a floración del grupo de híbridos fue 101 días (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2001).

En Río Bravo, los tres grupos (líneas B, R e híbridos) presentaron síntomas de inadaptación que se reflejaron en bajos rendimientos de grano. En promedio de tres ambientes (uno con riego y dos en temporal), el rendimiento fue 1724, 1518 y 1308 kg ha⁻¹ para híbridos, líneas B y líneas R, respectivamente. Sin embargo, la floración del grupo de híbridos (70 días) fue más precoz que los híbridos testigos, lo que indica que el carácter de tolerancia al frío es una opción para incrementar la precocidad. En Celaya, en promedio de dos ambientes (uno con riego y otro en temporal), el grupo de híbridos produjo 4155 kg ha⁻¹ y sus progenitores B y R rindieron 2638 y 4201 kg ha⁻¹, respectivamente. Con base en estos resultados, se demostró que las líneas TF no solo presentaron un buen comportamiento agronómico en los Valles Altos Centrales de México, sino que también son una opción conveniente para formar híbridos de

mayor rendimiento para regiones sorgueras como Guanajuato (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2001).

Con el propósito de diversificar y aumentar el número de líneas B tolerantes al frío, se realizaron cruces entre las líneas B de la primera generación, y mediante el método genealógico se generaron nuevas líneas A y B con mejores características agronómicas que sus predecesoras. Además, las líneas R de la primera generación se evaluaron en diversos ambientes y se seleccionaron las sobresalientes. En 1995 se obtuvo la “segunda generación de híbridos de sorgo TF”, y en 1996 se compararon ambas generaciones en tres localidades: Sta. Lucía (riego), Tecámac (riego y temporal) y Montecillo (riego y temporal).

En condiciones de riego, el rendimiento de grano promedio del grupo de híbridos de 2ª generación (48.85 g/planta, equivalente a 6.98 t ha⁻¹) fue superior ($p \leq 0.05$) al de los grupo de híbridos de 1ª generación y a VA-110, en 34 y 58 %, respectivamente. El mayor rendimiento de los híbridos de 2ª generación se atribuyó a los mayores valores en peso de cien semillas, longitud de la panoja y número de semillas por panoja, características que son los principales componentes del rendimiento de grano en sorgo (Maman *et al.*, 2004).

El grupo de híbridos de 2ª generación presentó 45 % de heterosis media y 19 % de heterosis superior, contra 28 y 24 %, respectivamente, de los híbridos de 1ª generación. Además, los nuevos híbridos fueron 4 días más precoces, con granos más pesados y plantas de mayor porte, panojas más largas y con más excursión que los de 1ª generación. El rendimiento del grupo de líneas restauradoras de 2ª generación fue 40.92 g/planta (5.85 t ha⁻¹), superior en 39 % al del grupo R de la 1ª generación y en 32 % al de VA-110; incluso el rendimiento de grano de estas líneas superó al grupo de híbridos de 1ª generación. Los grupos de líneas B de ambas generaciones resultaron ser iguales en rendimiento de grano, peso de grano, número de granos por panoja y altura de planta; sin embargo, las de la 2ª generación fueron 4 días más precoces y con mayor longitud de excursión (León-Velasco *et al.*, 2009).

En los experimentos conducidos en temporal los rendimientos de grano fueron menores que en riego, pero las tendencias del comportamiento agronómico entre híbridos y entre líneas de ambas generaciones fueron similares a los resultados obtenidos en riego (León-Velasco *et al.*, 2009).

Estos resultados indican que la recombinación genética y la selección aplicada para la obtención de los progenitores de 2ª generación produjo híbridos más rendidores, más precoces y de mejores características agronómicas que las de los híbridos de 1ª generación (León-Velasco *et al.*, 2009).

3. Calidad fisiológica de la semilla de genotipos tolerantes al frío

Los híbridos experimentales de primera generación tolerantes al frío presentaban un lento crecimiento de plántulas en las primeras semanas posteriores a la emergencia, comparado con el maíz (*Zea mays* L.), lo cual se atribuyó al reducido peso de la semilla. Sin embargo, Cisneros-López *et al.* (2007) confirmaron que el mayor peso de la semilla de los híbridos de segunda generación no estuvo asociado con mejores atributos de germinación de la semilla, ni de emergencia de plántulas. Al buscar explicaciones o alternativas de solución al lento crecimiento de plántulas de sorgos tolerantes al frío se evaluaron cuatro tratamientos de vigorización de la semilla, los que tampoco fueron una opción adecuada para aumentar el éxito de establecimiento de plántulas de sorgo en el campo (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006, 2007).

Posteriormente, con el propósito de evaluar los avances en la selección visual por tamaño de semilla y sus componentes (endospermo y embrión) de la 1ª generación vs. 2ª generación de líneas B, se evaluaron los cruzamientos directos y recíprocos de seis pares de líneas isogénicas (A/B) de la 1ª generación y ocho pares de la 2ª generación. El mayor peso de semilla, endospermo y embrión de las líneas B de la 2ª generación superaron en 25, 19 y 57 % a los pesos respectivos de las líneas B de 1ª generación, lo que indicó que la selección visual

fue eficaz. En la prueba de germinación estándar, las cruzas AxB correspondientes a la 2ª generación presentaron mejor germinación (88 vs. 78 %); en la prueba en cama de arena el grupo de cruzas de 2ª generación superó al grupo de la 1ª en peso seco y longitud de plúmula y radícula, aunque los de 1ª generación obtuvieron mayores valores de longitud de mesocotilo, velocidad de emergencia y porcentaje de plántulas emergidas, lo que significa que el mejoramiento genético para tamaño de semilla es viable pero que la relación del tamaño de semilla con la germinación y el vigor de plántula es de naturaleza compleja (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2011).

Es importante mencionar que en el estudio de Valadez-Gutiérrez *et al.* (2011) se observó que los efectos maternos no fueron significativos en las variables relacionadas con la germinación en ninguna de las dos generaciones de cruzas A x B; en cambio, los efectos recíprocos sí presentaron efectos significativos, lo cual indica que la germinación fue diferente cuando un material genético intervino como hembra que cuando fue macho.

En México no se tenían antecedentes de estudios genéticos en los que se evaluaran cruzas A x B no isogénicas, que por la naturaleza androestéril de la línea A genera híbridos simples AxB también androestériles y que a su vez permite producir híbridos trilineales de manera práctica. De esta manera un siguiente paso del programa de mejoramiento de sorgos tolerantes al frío fue generar híbridos trilineales para compararlos con los híbridos simples con base en su comportamiento genético y agronómico.

4. Híbridos simples vs. híbridos trilineales

Stephens y Holland (1954) descubrieron la androesterilidad genético-citoplásmica que permitió explotar la heterosis y producir semilla híbrida de sorgo en forma práctica y a bajo costo. De esa manera se inició una época de investigaciones relacionadas con la formación y

evaluación de híbridos simples y trilineales, bajo el supuesto de que éstos podrían presentar una mayor estabilidad de rendimiento en diferentes condiciones ambientales, con la ventaja adicional sobre los híbridos simples de que como su progenitor femenino es una cruce simple, podría formar plantas más vigorosas y con mayor producción de semilla.

Al respecto, Pathanothai y Atkins (1974) realizaron un estudio en nueve ambientes en Iowa, EE.UU., donde encontraron que el rendimiento de grano de los HT fue numéricamente menor en siete ambientes y ligeramente mayor en dos ambientes que los HS; sin embargo, no hubo diferencias significativas en ambiente alguno. De igual modo, Walsh y Atkins (1973) encontraron que los dos tipos de híbridos no difirieron significativamente en las variables rendimiento de grano, altura de planta y días a floración.

En África se evaluó la estabilidad del rendimiento de grano de HS, HT y líneas endogámicas de sorgo, demostrándose que los híbridos fueron más estables que las líneas, pero no hubo diferencias significativas entre los dos tipos de híbridos, aunque por la mayor heterogeneidad los HT presentaron menores reducciones del rendimiento en presencia de enfermedades e insectos (Jowett, 1972). Da Costa *et al.* (2005) utilizaron híbridos trilineales como una estrategia para el manejo de la resistencia a la antracnosis causada por *Colletotrichum graminicola*, con resultados positivos.

En México no existe oferta de semilla de híbridos trilineales de sorgo. Sin embargo, en maíz (*Zea mays* L.) estos híbridos son altamente redituables para las empresas productoras de semillas por la heterosis para rendimiento que presenta la cruce simple (progenitor femenino) en contraste con el rendimiento que produce una línea homocigótica que participa como progenitor femenino de un híbrido simple (Reyes, 1985).

OBJETIVOS GENERALES

1. Comparar la magnitud de la heterosis y la aptitud combinatoria general y específica de variables relacionadas con la calidad fisiológica de la semilla de híbridos simples y trilineales de sorgo.
2. Comparar el comportamiento genético y agronómico de líneas progenitoras, híbridos simples y trilineales de sorgo tolerantes al frío en dos condiciones de campo.
3. Realizar la descripción varietal de las líneas B y R sobresalientes con base en las normas del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas.

HIPÓTESIS GENERALES

1. La magnitud de la heterosis y los valores de aptitud combinatoria general y específica en las variables evaluadas es diferente entre los híbridos simples y los híbridos trilineales.
2. Las líneas progenitoras y los híbridos simples y trilineales de sorgo tolerantes al frío presentan diferente comportamiento genético y agronómico, además de tener una respuesta diferencial a las variaciones ambientales.

LITERATURA CITADA

Bond, J., Allen, E., Capehart, T., & Hansen, J. 2015. U. S. Sorghum Markets in Transition: Trade Policies Drive Export Volume. Feed Outlook: Special Article, United States Department of Agriculture, Economic Research Service. Obtenido de <http://www.ers.usda.gov/publications/fds-feedoutlook.aspx>.

Cisneros-López, M. E., Mendoza-Onofre, L. E., Mora-Aguilera, G., Córdova-Téllez, L. and Livera-Muñoz, M. 2007. Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Seed quality and its effects on seedling establishment. *Agrociencia* 41: 45-55.

Da Costa, V. R., Casela, R. C., Zambolim, L., Santos, G. F. and do Vale, R. X. F. 2005. Evaluation of genetic mixtures of sorghum lines for anthracnose resistance management. *Fitopatologia Brasileira* 30: 525-526.

FIRA. 2015. Panorama Agroalimentario: Sorgo 2015. 40 p.

Jowett, D. 1972. Yield stability parameters for sorghum in East Africa. *Crop Science* 12: 314-317.

Hawkes, L. 2015. China wants more sorghum. Consultado el 1 de septiembre de 2015 <http://southwestfarmpress.com/grains/china-wants-more-us-sorghum>.

León-Velasco, H., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo-González, F., Cervantes-Santana, T., and Martínez-Garza, Á. 2009. Evaluation of two generations of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Genetic variability and adaptability. *Agrociencia* 43: 483-496.

Livera M., M y A. Carballo C. 1985 Ampliación de las áreas de adaptación del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). I: Análisis del potencial productivo de genotipos tolerantes al frío en los Valles Altos. *Fitotecnia* 7: 96-113.

Maman, N., Mason, C. S., Lyon, J. D. and Dhungana, P. 2004. Yield components of pearl millet and grain sorghum across environments in the Central Great Plains. *Crop Science* 44: 2138-2145.

Mendoza-Onofre, L. E. 1992. Grain of first cold tolerant sorghum hybrids developed in Mexico. *Sorghum Newsletter* 33:62.

Osuna-Ortega, J., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Castillo González, F., Mendoza-Castillo, M. del C. and Williams-Alanís, H. 2000. Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México: I. High Valleys. *Agrociencia* 34: 561-572.

Osuna-Ortega, J., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo González, F., González-Hernández, V. A., Mendoza-Castillo, M. del C., Williams-Alanís, H. and Hernández-Martínez, M. 2001.

Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México: II. Rio Bravo, Tamaulipas; and Celaya, Guanajuato. *Agrociencia* 35: 625-636.

Osuna-Ortega, J., Mendoza-Castillo, M. del C. and Mendoza-Onofre, L. E. 2003. Sorghum cold tolerance, pollen production, and seed yield in the Central High Valleys of Mexico. *Maydica*: 48: 125-132.

Patanothai, A. and Atkins, R. E. 1974. Yields stability of single crosses and three-way hybrids of grain sorghum. *Crop Science* 14: 287-290.

Romo C., E. y A. Carballo C. 1980. Características de tres variedades de sorgo para los Valles Altos. Circular CIAMEC 130. INIA-SARH. Chapingo, México. 11 p.

SIAP-SAGARPA. 2016. Consultado el 20 de octubre de 2016. http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2015/Atlas-Agroalimentario-2015.

Stephens, J. C. and Holland, R. F. 1954. Cytoplasmic male-sterility for hybrid sorghum seed production. *Agronomy Journal* 46: 20-23.

Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Vaquera-Huerta, H., Córdova-Téllez, L., Mendoza-Castillo, Ma. del C. and García-de los Santos, G. 2006. Flowers thinning, seed yield and post-anthesis dry matter distribution in sorghum. *Agrociencia* 40: 303-314.

Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Córdova-Téllez, L., Vaquera-Huerta, H., Mendoza-Castillo, Ma. del C. and García-de los Santos, G. 2007. Seed sizes, invigorization substances, and vigor tests in cold tolerant sorghums. *Agrociencia* 41: 169-179.

Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo-González, F., Córdova-Téllez L. and Mendoza-Castillo, Ma. del C. 2011. Selection for seed size and its effects on seed germination and seedling vigor of sorghum maintainer lines. *Agrociencia* 45: 893-909.

Walsh, E. J. and Atkins, R. E. 1973. Performance and within-hybrid variability of three-way and single crosses of grain sorghum. *Crop Science* 13: 267-271.

**CAPÍTULO I. HETEROSIS AND COMBINING ABILITY OF SEED
PHYSIOLOGICAL QUALITY TRAITS OF SINGLE CROSS VS. THREE-WAY
SORGHUM HYBRIDS[†]**

I.1 ABSTRACT

The aim of this research was to compare genetic parameters for traits related with seed germination and seedling vigour of single cross (SCH) vs. three-way (TWH) sorghum hybrids. The study was conducted in a sand bed under a greenhouse; 67 genotypes (four pairs of A- and B- lines, four R- lines, 13 SCH and 42 TWH) were allocated in a randomized complete blocks experimental design with three replications. Statistical analysis included ANOVA's and Student "t" tests, while Tukey test ($p \leq 0.05$) was applied for mean comparisons. The R-lines showed better physiological seed quality attributes than the A- and B- lines. The seed quality and heterosis values of SCH vs. that TWH did not show significant differences ($p > 0.05$) for any variable; however, heterobeltiosis of SCH was higher than that of TWY for normal seedlings, dry weight of plumule and seedling emergence rate. The A2- line and R14 restorer line showed the highest GCA values in both types of hybrids. No differences ($p \leq 0.05$) were found between maternal and paternal effects of the A- and B- lines involved in the male sterile cross (female parent) of the TWH, except for plumule length in Line 5.

Keywords: *Sorghum bicolor* L. Moench, maternal effects, seedling emergence, sorghum lines, top-cross tests.

[†]: **Versión aceptada para publicación en la revista Acta Scientiarum. Agronomy, por lo que se ha respetado el formato de la misma.**

I.2 INTRODUCTION

In commercial seed production of single cross hybrids of grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] two lines are involved: a male-sterile line (A- line, female), and a male fertile line (R- line, restorer) (León-Velasco *et al.*, 2009a). In the three-way sorghum hybrids three lines are used since the female parent is a male-sterile cross of an A- line and a B- non isogenic line, and the male parent is an R- line. In both hybrid types, the progenie may express a higher plant vigour than the parents, an effect named heterosis, which is a relevant genetic trait frequently measured and used in plant breeding.

Mean heterosis (called as heterosis hereafter) is calculated based on the performance of the F1 hybrid with regard to the average performance of both parental lines (Kumar *et al.*, 2012); the high parent heterosis (called as heterobeltiosis hereafter) refers to the F1 hybrid behaviour with respect to the best parental line (Hayes and Rooney, 2014). Heterosis brings gains in grain yield, earlier flowering, greater number of leaves, taller plants, more tillers and panicles per plant, heavier seeds, more seeds per panicle (Acquaah, 2012), a faster seedling emergence rate, more vigourous seedlings and a higher plumule dry weight (Yu and Tuinstra, 2001; Cisneros-López *et al.*, 2007; León-Velasco *et al.*, 2009a). Compared to the three-way experimental sorghum hybrids, the single cross hybrids show a higher heterosis for grain yield (Rooney, 2004).

The three-way sorghum hybrids are not commercially grown in México (Montes-García *et al.*, 2012) nor anywhere else. However, in corn (*Zea mays* L.) these hybrids are highly profitable for seed producing companies due to the high heterosis obtained for seed yield in the female single cross (female parent of this type of hybrid), as contrasted to the lower seed yield harvested from a female pure-line (female parent of the single cross hybrid) (Beck, 2002).

Several A-, B- and R- sorghum lines adapted to the Mexican Highlands have been developed and single cross hybrids have been evaluated under field conditions for different purposes (Osuna-Ortega *et al.*, 2000; Cisneros-López *et al.*, 2007, 2010, 2012; León-Velasco *et al.*, 2009a). In this region (mean annual rainfall, 655 mm; average daily temperature, 16.3 °C; 2250 m of altitude) seedling growth of experimental conventional (single cross) sorghum hybrids is slow at the beginning of the growing season. In seedling emergence tests conducted in sand beds, seed size has not been the main responsible factor of this slow sorghum seedling growth (Cisneros-López *et al.*, 2007; Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2007). On the other hand, the physiological seed quality traits of three-way sorghum hybrids are unknown. Therefore, it is necessary to compare these traits in three-way hybrids *vs.* single cross hybrids, assuming that in the three-way hybrids the single cross female parent seeds will have better physiological attributes than those produced by the pure female line.

A genetic trait closely related to heterosis is the combining ability of the parents. The general combining ability (GCA) is the capacity of an individual or a population of individuals to combine with others, and it is estimated by the average performance in their hybrid combinations, whereas the specific combining ability (SCA) is the particular performance of two parental lines in a hybrid combination. These two responses are useful to select parental lines of sorghum hybrids (Kenga *et al.*, 2004; Solanki *et al.*, 2007; León-Velasco *et al.*, 2009b).

The diallel crosses are widely used for measuring the GCA and SCA effects of agronomic traits in plant breeding programs. The top-cross test that involves crosses of corn lines with a tester, is another option to estimate GCA (Bradshaw, 2016). In three-way corn hybrids the more common tester is a single cross hybrid or a pure-line (Beck, 2002), whereas in single cross hybrids the elite lines are used as testers (Hallauer *et al.*, 2010). According to Castañón *et al.* (1998), the top-cross test has successfully substituted the diallel crosses because it reduces pollination costs.

The aim of this research was to compare the magnitude of the heterosis, heterobeltiosis, and the general and specific combining ability on seed physiological quality traits of single cross hybrids *vs.* three-way hybrids of sorghum, as well as maternal *vs.* paternal effects of single AxB crosses for those traits.

I.3 MATERIALS AND METHODS

Seed of isogenic and non isogenic single crosses AxB was increased in the spring-summer growing season of year 2012, according to a diallel scheme (Figure I.1). Four pairs of A- and B- lines were included, so sixteen AxB male-sterile crosses were obtained. Four of these crosses correspond to isogenic AxB crosses; it means these are seed increments of the A- line (the female parental line of single cross hybrids). The other twelve are non isogenic crosses that correspond to the female parental single cross of the three-way hybrids. In addition, in this diallel we can also differentiate maternal *vs.* paternal effects of the isogenic A- and B- lines. For example, the average of A1xB2, A1xB3 and A1xB5 crosses will correspond to the performance of the A1- line as a female parent (maternal effects), and the average of A2xB1, A3xB1 and A5xB1 crosses will correspond to the performance of the B1- line (known as the maintainer line, isogenic of the A1- line) as a male parent (paternal effects).

Male sterile lines	Maintainer lines			
	B1	B2	B3	B5
A1	A1xB1	A1xB2	A1xB3	A1xB5
A2	<i>A2xB1</i>	A2xB2	A2xB3	A2xB5
A3	<i>A3xB1</i>	A3xB2	A3xB3	A3xB5
A5	<i>A5xB1</i>	A5xB2	A5xB3	A5xB5

Figure I. 1 Diallel scheme of isogenic and non isogenic AxB crosses. Isogenic crosses (boxes in white); non isogenic crosses (boxes in grey). Non isogenic crosses to analyze maternal effects of the A1 line (bold letters) and paternal effects of the B1 line (italics letters).

Seed from the single cross hybrids and the three-way hybrids was increased in the 2013 growing season, by hand made pollinations between the sixteen AxB crosses and four R- lines (R14, R17, R19 and R25).

I.3.1 Seedling emergence test

This experiment was established in June 2014, including 67 genotypes (four pairs of A- and B- lines; four R- lines; 13 out of the expected 16 single cross hybrids, and 42 out of the 48 possible three-way hybrids), according to seed availability. Seed was sown in sand beds within a greenhouse. The experimental units were rows of 50 cm length, 5 cm apart. In each row 25 seeds were placed every 2 cm at 5 cm depth. Treatments were allocated in a randomized blocks design with three replications.

Variables measured in each plot were:

Seedling emergence rate (SER): Seedlings were counted daily (as soon as the plumule became visible) until no more seedlings emerged in three consecutive days. Then SER was estimated with the equation of Maguire (1962): $SER = \sum_i^n (X_i/N_i)$, where X_i = number of emerged seedlings on day i , and N_i = number of days after sowing including day i .

Normal seedlings (NS), abnormal seedlings (AS) and dead seeds (DS) were also counted at the end of the essay, as specified by ISTA (1999) rules, and its respective percentages were calculated. Additionally, plumule length (PL) and plumule dry weight (PDW) from 10 normal seedlings were measured; PL was the length (cm) from the base of the stem to the apex of the youngest leaf; and PDW (mg per seedling) was recorded after seedlings were dried in an oven at 75 °C for 72 h.

Heterosis [(Performance of the F1/Average performance of the parental lines: two in single cross hybrids and three in three-way hybrids) x 100] and heterobeltiosis [(Performance

of the F1/Performance of the best parent) x 100] (Hayes and Rooney, 2014) were calculated for each hybrid. Data of the fertile lines (B and R) was used in these calculations to assure a full seed set of the panicles.

Estimates of GCA and SCA in both types of hybrids were obtained considering top-cross tests. In these tests, the term “lines” were assigned to each A- line in the analysis of single cross hybrids, and to the non isogenic AxB crosses in the three-way hybrids. The term “tester” was assigned to the R- lines. Therefore, the GCA of lines and testers were estimated through their respective averages; the SCA corresponded to the interaction of line x tester.

Maternal effects *vs.* paternal effects were compared for each AxB non isogenic crosses participating in the three-way hybrids. Maternal effects correspond to hybrids in which the version A of the line acted as female parent (direct cross), while paternal effects were those hybrids in which the maintainer B-line participated as the male parent (reciprocal cross) (Figure I.1) of the male sterile single crosses. Therefore, the statistical contrast between maternal *vs.* paternal effects of Line 1, would correspond to the average performance of A1xB2, A1xB3, A1xB5 crosses (direct crosses, maternal effects) *vs.* the average performance of A2xB1, A3xB1 and A5xB1 crosses (reciprocal crosses, paternal effects), crossed to each R-line.

I.3.2 Statistical analyses

The statistical package SAS (2002) was used. Prior to the statistical analyses, an angular transformation [$\arcsin (Y_i)^{1/2}$] to the percentage data (Y_i) was applied but results are shown in percentages. Mean comparison tests were applied (Tukey, $p \leq 0.05$) among genotype groups (A-, B-, R- lines, single cross hybrids and three-way hybrids). Since each hybrid group was represented by different number of observations (because there was not enough seed in some hybrids), PROC GLM of SAS (2002) was used to carry out the ANOVA's analysis. Statistical

contrasts between the averages of the heterosis estimates of the 13 single cross hybrids vs. that of the 42 three-way hybrids were made by the Student “t” base on an unpaired design. To compare the differences of maternal effects vs. paternal effects the Student “t” test was also performed.

I.4 RESULTS AND DISCUSSION

I.4.1 Comparisons of groups of genotypes

There were significant differences ($p \leq 0.05$) among genotypes for all the genotypes groups (grouped according to their role in a sorghum breeding program), for all seed physiological quality traits, except for abnormal seedlings (Table I.1).

Table I. 1 Square means and significance of the source of variation of the groups of genotypes for seed physiological quality traits.

Source of variation	DF	Normal seedlings	Abnormal seedlings	Dead seeds	Plumule length	Plumule dry weight	Seddlings emergence rate
Groups	4	1337.76**	47.17ns	1267.43**	30.12**	334.11**	8.43**
Replications	2	97.62ns	821.93ns	87.90ns	38.53**	146.59**	0.41ns
Error	194	85.88	70.70	79.19	1.40	12.59	0.51
VC (%)		17	62	28	13	26	28

DF: Degrees of freedom; VC: variation coefficient; **: Significance of the F test ($p \leq 0.01$): ns: not significant.

Among parental lines, the male R-lines group showed much better seed physiological quality attributes than the A- and B- line groups; *i.e.*, higher percentage of normal seedlings, faster seedling emergence, as well as longer and heavier seedling plumules (Table I.2). Most interestingly, the seed from the R- lines group was as good as the seed from the single cross and three-way hybrids regarding seed physiological quality traits.

Table I. 2 Means of seed physiological quality traits for each group of sorghum genotypes.

Genotype group	Normal seedlings (%)	Abnormal seedlings (%)	Dead seeds (%)	Plumule length (cm)	Plumule dry weight (mg)	Seed emergence rate (Nd ⁻¹)
A- lines (n=4)	45 b	9 a	44 b	7.78 b	8.5 b	1.76 b
B- lines (n=4)	40 b	6 a	52 b	6.24 c	6.1 b	1.42 b
R- lines (n=4)	73 a	5 a	19 a	8.75 ab	13.7 a	2.93 a
Single cross hybrids (n=13)	74 a	6 a	20 a	9.55 a	16.5 a	3.03 a
Three-way hybrids (n=42)	64 a	5 a	28 a	9.08 a	14.0 a	2.50 a

A: Male sterile lines; B: Maintainer lines; R: Restorer lines; (n): Number of genotypes involved in the average; Values with the same letter in each column are not significant different (Tukey, $\leq p$ 0.05).

Instead, the A- and B- inbred lines groups showed similar seed quality due to their isogenic nature. Under field conditions these lines are “3-dwarf” types (Brown *et al.*, 2008) although our R- lines are usually more vigorous and reach higher stem size than isolines at harvest (León-Velasco *et al.*, 2009a). There were no differences in seed physiological quality traits between the single cross hybrids and the three-way hybrids. These results clearly show that morphological differences in plant vigour can be detected as early as the seedling growth stage.

Cisneros-López *et al.* (2007) compared also seed germination and seedling emergence rate of single cross hybrids and their parental lines under field (same location as the present study), and laboratory conditions. They did not find either any significant difference between the hybrids and the R- lines, for percentages of normal seedlings, abnormal seedlings and dead seeds, plumule length and seedlings emergence rate. Yu and Tuinstra (2001) found similar results for variables related with seedling emergence rate in sorghum. That is, the *per se* seed performance of our group of R- lines is as good as that of seed obtained from hybrids. The absence of significant differences between the means of both group of hybrids also suggest that the seed physiological quality traits do not rely on the female parents involved (pure-line for

single cross hybrids or AxB non isogenic crosses for three-way hybrids), since all our male parents (R- lines) were the same in both types of hybrids.

I.4.2 Heterosis

Table I.3 shows three features on the heterosis and heterobeltiosis results: (i) There were not significant differences ($p > 0.05$) for heterosis between single cross and three-way hybrids, in any of the four seed quality traits; (ii) Heterosis had greater values than those of heterobeltiosis for all traits in both types of hybrids; (iii) Single cross hybrids had higher heterobeltiosis than three-way hybrids for normal seedlings, plumule dry weight and seedling emergence rate.

Table I. 3 Values of heterosis and heterobeltiosis for seed physiological quality traits for single cross and three-way sorghum hybrids.

Type of hybrids	Normal seedlings	Plumule length	Plumule dry weight	Seedling emergence rate
<u>Heterosis</u>				
Single cross hybrids (n=13)	126 a	126 a	166 a	137 a
Three-way hybrids (n=42)	125 a	132 a	164 a	130 a
<u>Heterobeltiosis</u>				
Single cross hybrids (n=13)	100 a	111 a	126 a	104 a
Three-way hybrids (n=42)	88 b	105 a	105 b	86 b

n: Number of genotypes involved in the average; values with the same letter in each column, are not significant different (Student “t” test, $\leq p 0.05$).

Heterotic effects are expected to be maximized in single crosses depending upon the genetic diversity of the parental lines and the homocigous level of these lines. Contrary to cross pollinated species such as maize, sorghum is a self-pollinated specie in which homocigosity can be reached without an important decrease in vigour. The high heterosis values obtained here for the single cross hybrids (from 126 and 166 % depending upon to the trait involved)

indicate that in this group of parental lines exist genetic divergence between the A- lines and the R- lines.

After evaluating parental lines with similar pedigrees under field conditions, Cisneros-López *et al.* (2007) found lower heterosis values (normal seedlings, 90 %; plumule length, 98 % and seedling emergence rate, 107 %) for single cross hybrids than in our study. These differences in heterosis might be due to differences in environmental conditions, more adverse in the field for seed germination and seedlings emergence rate with respect to the sand bed test done under greenhouse conditions in our study. Heterosis in biomass production at early stages of development has also been observed under chilling temperatures in sorghum (Windpassinger *et al.*, 2016) as well as in classical molecular biology studies on *Arabidopsis* (Meyer *et al.*, 2004).

According to Márquez (1988), heterosis will decrease as the number of parental lines involved in a hybrid increases (two in a single cross hybrid, three in a three-way hybrid or four in a double cross hybrid), probably because it is less likely that all pairs of genes will combine for favourable characters. Our results indicate that in this group of parental lines this phenomenon do not occur, as three-way crosses and single crosses has similar heterosis values (Table I.2). This response may be related to a similar proportion of allelic additively expressed genes associated with heterosis in the early stage of development of both types of hybrids.

The heterobeltiosis values were of lower magnitude that those of heterosis in both types of hybrids. Cisneros-López *et al.* (2007) also found that heterobeltiosis values of the group of single cross hybrids were lower that the heterosis values (normal seedlings, 89 vs. 90%; plumule length, 94 vs. 98 %; seed emergence rate, 92 vs. 107 %). However, heterobeltiosis data represents greater agronomical importance than heterosis as the first indicates the superiority of the hybrid compared to the best parental line (Lamkey and Edwards, 1999).

I.4.3 General and specific combining ability

Lines and testers in single cross hybrids

No significant difference ($p > 0.05$) were found in the GCA of lines and testers for most of the seed quality measured traits, but line A2- tended to be better than the other females A-lines. There were not significant differences among testers either, except for seedling emergence rate of R 14 and R19 male lines (Table I.4). Regarding the specific combining ability (SCA), the best combination for normal seedlings and seedlings emergence rate was the A2xR14 single cross hybrid.

Lines and testers in three-way hybrids

Similar to the single cross hybrids results, in the three-way hybrids the A and B versions of Line 2, and R14 among testers, were the only ones with high values of GCA for normal seedlings, plumule dry weight and seedling emergence rate (Table I.5). Regarding SCA estimates, the superiority of R14 tester is evident, because when it is crossed to any female single cross, seeds of the three-way hybrids produce more normal seedlings, which can emerge at a faster rate (Table I.5).

I.4.4 Maternal vs. paternal effects in the non isogenic female cross of three-way hybrids

There were not significant differences between maternal effects (the A- versions) vs. paternal effects (the B- versions) of each pair of A/B lines, except for the plumule length of Line 5. Three-way hybrids in which the A- version was involved showed longer plumule (9.22 cm) than those hybrids in which the female crosses included the B- version (8.61 cm). These results indicate that there are not nuclear and mitochondrial gene interactions in the seedling growth response of our A/B elite lines.

Table I. 4 Estimated values of general and specific combining ability (GCA and SCA) for seed physiological quality traits of female and male lines in single cross hybrids.

Female lines	Testers (male lines)				GCA
	R14	R17	R19	R25	
<u>Normal seedlings (%)</u>					
A1	67 ab	--	--	79 ab	73 AB
A2	85 a	77 ab	83 a	81 ab	82 A
A3	82 a	65 ab	64 ab	--	70 AB
A5	72 ab	47 ab	74 ab	69 ab	66 B
GCA	77 W	63 W	74 W	76 W	
<u>Plumule length (cm)</u>					
A1	8.53 a	--	--	9.40 a	8.97 A
A2	9.80 a	10.50 a	9.93 a	9.67 a	9.98 A
A3	10.07 a	9.40 a	9.70 a	--	9.72 A
A5	8.70 a	9.10 a	9.50 a	9.80 a	9.27 A
GCA	9.27 W	9.67 W	9.71 W	9.62 W	
<u>Plumule dry weight (mg)</u>					
A1	12.4 a	--	--	16.4 a	14.4 A
A2	18.1 a	18.2 a	20.6 a	17.7 a	18.7 A
A3	18.0 a	15.1 a	19.1 a	--	17.4 A
A5	12.8 a	14.6 a	15.4 a	16.3 a	14.8 A
GCA	15.3 W	16.0 W	18.4 W	16.8 W	
<u>Seedlings emergence rate (N d⁻¹)</u>					
A1	2.62 ce	--	--	3.38 ad	3.00 B
A2	4.14 a	3.04 bd	3.72 ab	3.69 ac	3.65 A
A3	3.37 ad	2.71 be	2.40 de	--	2.83 B
A5	2.70 be	1.93 e	2.68 be	3.06 ad	2.59 B
GCA	3.21 W	2.56 X	2.93 WX	3.38 W	

GCA values with the same capital letter, or SCA values with the same lower case letter in each trait, are not significant different (Tukey, $p \leq 0.05$); --: hybrid not included in test.

Table I. 5 Estimated values of general and specific combining ability (GCA and SCA) for seed physiological quality traits of female and male lines in three-way hybrids.

Female lines	Testers (male lines)				GCA
	R14	R17	R19	R25	
	<u>Normal seedlings (%)</u>				
A1/B1	80 a	48 e	61 ce	61 ce	63 A
A2/B2	72 ac	55 de	68 ad	73 ac	67 A
A3/B3	78 ab	58 ce	54 de	65 bd	64 A
A5/B5	69 ad	53 de	63 ce	60 ce	61 A
GCA	75 W	53 Y	62 X	65 X	
	<u>Plumule length (cm)</u>				
A1/B1	9.47 a	9.66 a	8.64 a	8.41 a	9.05 A
A2/B2	8.98 a	9.59 a	9.20 a	8.87 a	9.16 A
A3/B3	9.65 a	9.71 a	8.72 a	8.77 a	9.21 A
A5/B5	9.28 a	9.04 a	8.82 a	8.56 a	8.93 A
GCA	9.35 WX	9.50 W	8.84 XY	8.65 Y	
	<u>Plumule dry weight (mg)</u>				
A1/B1	15.1 a	14.8 a	13.7 a	12.3 a	14.0 A
A2/B2	14.1 a	14.9 a	16.1 a	13.1 a	14.6 A
A3/B3	16.0 a	15.3 a	13.2 a	13.5 a	14.5 A
A5/B5	14.9 a	12.4 a	14.0 a	11.8 a	13.3 A
GCA	15.0 W	14.3 WX	14.3 WX	12.7 X	
	<u>Seedlings emergence rate (Nd⁻¹)</u>				
A1/B1	3.36 a	1.67 g	2.27 dg	2.37 dg	2.42 AB
A2/B2	3.12 ac	2.10 eg	2.57 ce	2.90 ad	2.67 A
A3/B3	3.31 ab	2.25 dg	1.97 eg	2.64 be	2.54 AB
A5/B5	2.82 ad	1.85 fg	2.21 dg	2.49 cf	2.34 B
GCA	3.15 W	1.96 Z	2.25 Y	2.60 X	

GCA values with the same capital letter, or SCA values with the same lower case letter in each trait, are not significant different (Tukey, $p \leq 0.05$).

I.5 CONCLUSION

There were significant differences among genotypes for physiological quality traits of sorghum seeds. The R- lines group showed better seed quality traits than A- and B- lines groups. Single cross hybrids and three-way hybrids showed similar seed quality and heterosis values. The A2-line and the R14 restorer line stand out as the best candidates to be used as parental lines for seed physiological quality traits. There were not significant differences between maternal vs. paternal effects in physiological quality traits of sorghum seeds. Morphological differences in plant vigour can be detected in the seedling growth stage.

I.6 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the scholarship granted to the first author by the National Council of Science and Technology of México (CONACYT).

I.7 REFERENCES

- Acquaah, G. (2012). *Principles of Plant Genetics and Breeding*. Chapter: 34. Breeding Sorghum. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd: Wiley Online Library.
- Beck, D. L. (2002). *Management of Hybrid Maize Seed Production*. El Batan, Mexico: CIMMYT.
- Bradshaw, J. E. (2016). *Plant Breeding, Past, Present and Future*. Edinburg, U. K.: Spring.
- Brown, P. J., Rooney, W. L., Franks, C. & Kresovich, S. (2008). Efficient mapping of plant height quantitative trait loci in a sorghum association population with introgressed dwarfing genes. *Genetics* 180, 629-637.

- Castañón, G., Jeffers, D., Hidalgo, H. & Tosquy, H. (1998). Prueba de mestizos de maíz en el estado de Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana* 9(2), 89-96.
- Cisneros-López, M., Mendoza-Onofre, L. E., Mora-Aguilera, G., Córdova-Téllez, L. & Livera-Muñoz, M. (2007). Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Seed quality and its effects on seedling establishment. *Agrociencia* 41(1), 45-55.
- Cisneros-López, M. E., Mendoza-Onofre, L. E., Zavaleta-Mancera, H. A., González-Hernández, V. A., Mora-Aguilera G., Córdova-Téllez L., & Hernández-Martínez, M. (2010). Pollen–pistil interaction, pistil histology and seed production in A x B grain sorghum crosses under chilling field temperatures. *Journal of Agricultural Science* 148, 73-82.
- Cisneros-López, Ma. E., Mendoza-Onofre, L. E., & González-Hernández, V. A. (2012). Male parent effects on stigma receptivity and seed set of sorghum A-lines under chilling field temperatures. *Plant Breeding* 131, 88-93.
- Hallauer, A. R., Carena, M. J., & Miranda Filho, J. B. (2010). *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. New York, USA: Springer.
- Hayes, C. M., & Rooney, W. L. (2014). Agronomic performance and heterosis of specialty grain sorghum hybrids with a black pericarp. *Euphytica* 196(3), 459-466.
- International Seed Testing Association, ISTA. (1999). *International Rules for Seed Testing*. Zurich, Switzerland: Int. Seed Testing Ass. (Ed).
- Kenga, R., Alabi, S. O. & Gupta, S. C. (2004). Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research* 88, 251-260.
- Kumar, A. A., Reedy, B. V. S., Ramaiah, B., & Sharma, R. (2012). Heterosis in white-grained grain mold resistant sorghum hybrids. *SAT eJournal. ICRISAT.ORG* 9, 1-6.
- Lamkey, K. R., & Edwards, J. W. (1999). *The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops*. Chapter 4: *Quantitative Genetics of Heterosis* (p. 31-48). Mexico City, Mexico: CIMMYT.

- León-Velasco, H., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo-González, F., Cervantes-Santana, T., & Martínez-Garza, A. (2009a). Evaluation of two generations of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Genetic variability and adaptability. *Agrociencia* 43(5), 483-496.
- León-Velasco, H., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo-González, F., Cervantes-Santana, T., & Martínez-Garza, A. (2009b). Evaluation of two generations of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. II: Combining ability, heterosis and heterobeltiosis. *Agrociencia* 43(6), 609-623.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination: Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science* 2, 176-177.
- Márquez, S. F. (1988). *Genotecnia Vegetal. Métodos, Teoría, Resultados. Tomo II*. México, D. F.: AGT Editor, S. A.
- Meyer, C. R., Törjék, O., Becher M., & Altmann, T. (2004). Heterosis of biomass production in Arabidopsis. Establishment during early development. *Plant Physiology* 134(4), 1813-1823.
- Montes-García, N., Williams-Alanís, H., Moreno-Gallegos, T., Cisneros-López, M. E., & Pecina-Quintero, V. (2012). 'RB Paloma', a white sorghum variety for grain and forage production. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(2), 185-187.
- Osuna-Ortega, J., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Castillo-González, F., Mendoza-Castillo, M. C., & Williams-Alanís, H. (2000). Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México. I: High Valleys. *Agrociencia* 34(5), 561-572.
- Rooney, W. L. (2004). Sorghum improvement-integrating traditional and new technology to produced improved genotypes. *Advances in Agronomy* 83, 38-96.
- Solanki, B. G., Patel, D. M., Patel, P. B., & Desai, R. T. (2007). Combining ability in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] for yield and its attributing traits (II). *Crop Research* 33, 187-191.

- Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Córdova-Téllez, L., Vaquera-Huerta, H., Mendoza-Castillo, Ma. C., & García-de los Santos, G. (2007). Seed sizes, invigorization substances, and vigor tests in cold tolerant sorghums. *Agrociencia* 41(2), 169-179.
- Windpassinger, S., Friedt, W., Deppé, I., Wener, C., Snowdon, R., & Wittkop, B. (2016). Towards enhancement of early-stage chilling tolerance and root development in sorghum F1 hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science*, doi. 10.1111/jac.12171.
- Yu, J., & Tuinstra, M. R. (2001). Genetic analysis of seedling growth under cold temperature stress in grain sorghum. *Crop Science* 41, 1438-1443.

CAPÍTULO II. COMPORTAMIENTO GENÉTICO Y AGRONÓMICO DE HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES DE SORGOS TOLERANTES AL FRÍO

II.1 RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue comparar el comportamiento genético (heterosis media y superior, ACG y ACE) y agronómico (rendimiento de semilla y sus componentes, entre otras) de líneas progenitoras, híbridos simples (HS) y trilineales (HT) de sorgo tolerantes al frío. En la primavera del año 2014 se establecieron dos experimentos (riego y temporal) que incluyeron al menos tres pares de líneas A/B, cuatro líneas R, 11 HS y 41 HT en Montecillo, Estado de México. En todas las variables hubo significancia de las fuentes de variación ambientes y grupos, excepto en longitud de panoja (entre ambientes) y peso de 100 semillas (entre grupos). La interacción ambientes x grupos solamente fue significativa para altura de planta y diámetro de tallo. Los grupos de líneas A y B no presentaron diferencias entre sí para variable alguna confirmándose su carácter isogénico. No hubo diferencias para peso de semillas por panoja y número de semillas por panoja entre la media del grupo de líneas R y la media de ambos grupos de híbridos por lo que las líneas restauradoras pueden sembrarse como variedades de polinización libre. En ambos tipos de híbridos las variables que más se asociaron con el peso de semillas por panoja fueron el peso de cien semillas y número de semillas por panoja. La heterosis media y superior fue de magnitud semejante entre ambos tipos de híbridos. La línea androestéril A1 y la línea restauradora R17 presentaron los mejores valores de ACG para rendimiento tanto en híbridos simples como en trilineales.

Palabras clave: sorgo, híbridos trilineales, heterosis, aptitud combinatoria general, comportamiento agronómico.

II.2 ABSTRACT

The purpose of this research was to compare genetic parameters (heterosis, high parent heterosis, GCA and SCA) as well as agronomic traits (seed yield and yield components, among others) of cold tolerant parental lines and corresponding single (SH) and three-way (TWH) sorghum hybrids. In the Spring 2014 growing season yield trials were established under two environmental conditions: irrigated and rainfall, at Montecillo, México. Both trials included at least three A/B lines, four R_lines, 11 SH and 41 TWH. Significant differences were found among environments and genotype groups for all traits except for panicle length (among environments) and 100-seed weight (among groups). Genotype groups x environment interaction was significant for plant height and stem diameter only. A/B groups traits were not significantly different ratifying its isogenic nature. None significant differences were found for seed yield and seed number per panicle between the average of the R_lines and that of both groups of hybrids indicating that the R_lines could be sown as open pollinated varieties. Seeds weight and number of seeds per panicle were the traits more associated with seed yield per panicle in both types of hybrids. Heterosis and high parent heterosis values were similar in both types of hybrids. A1_male sterile line and R17 restorer line showed the highest GCA values for seed yield in single and three-way sorghum hybrids.

Palabras clave: sorgo, híbridos trilineales, heterosis, aptitud combinatoria general, comportamiento agronómico.

II.3 INTRODUCCIÓN

El sorgo granífero [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es el quinto cereal más cultivado y consumido en el mundo después del maíz (*Zea mays* L.), el arroz (*Oriza sativa* L.), el trigo (*Triticum aestivum* L.) y la cebada (*Hordeum vulgare* L. (FAO, 2016). México ocupa el segundo sitio entre los principales productores (7.8 millones de toneladas) y en los últimos tres

años esta producción ha sido suficiente para abastecer el consumo interno pues solamente ha importado un promedio de 100 000 t (USDA, 2015). Sin embargo, esta situación puede cambiar ante la presencia de nuevas plagas, como es el caso del pulgón amarillo (*Melanaphis sacchari*) pues se estima que en el ciclo PV 2016 la superficie sembrada se redujo en 50 % en el Bajío. En este país, el sorgo se cultiva comercialmente solo en regiones tropicales o subtropicales y es el principal ingrediente en la formulación de alimentos balanceados en el sector pecuario (FND, 2014).

Casi toda la superficie de sorgo se siembra con semilla híbrida de cruza simple (AxR) (Cisneros-López *et al.*, 2007a). Para aumentar la capacidad de adaptación y adaptabilidad de las variedades comerciales de sorgo, se han desarrollado líneas A, B y R así como híbridos simples (HS) experimentales tolerantes al frío adaptados a los Valles Altos Centrales de México, donde prevalecen temperaturas mínimas mensuales cercanas a 8 °C durante la estación de crecimiento (abril a octubre). Esta región incluye localidades entre 2200 y 2600 m de altitud de los Estados de México, Morelos, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Además, existen evidencias de que algunos híbridos que involucran progenitores masculinos o femeninos tolerantes al frío, al sembrarlos en zonas tropicales o subtropicales son más precoces con similar rendimiento de grano de los híbridos comerciales adaptados a esas condiciones (Osuna-Ortega *et al.*, 2000, 2001, 2003).

En los Valles Altos Centrales el rendimiento de grano de los híbridos experimentales ha sido variable y depende del ambiente de evaluación: 4.79 t ha⁻¹ en riego y 4.20 t ha⁻¹ en seco (Osuna-Ortega *et al.*, 2000); 4.72 t ha⁻¹ en riego (Cisneros-López *et al.*, 2007b); 7.97 t ha⁻¹ en riego y 2.49 t ha⁻¹ en seco (León-Velasco *et al.*, 2009a).

En un híbrido trilineal (HT) de sorgo intervienen tres líneas, en donde el progenitor femenino corresponde a un híbrido simple androestéril (producto del cruzamiento entre una línea A y una línea B no isogénica) y el progenitor masculino corresponde a una línea R,

restauradora de la fertilidad [(A x B no isogénica) x R]. Los estudios en los que se comparan HS vs. HT de sorgo son escasos y relativamente antiguos. En estudios pioneros efectuados durante las décadas de los 60's y 70's las diferencias en el rendimiento de grano entre ambos tipos de híbridos no fueron significativas (Walsh y Atkins, 1973; Patanothai y Atkins, 1974), o con reducidas ventajas a favor de los HS (Ross, 1969).

Jowett (1972) indica que la mayor diversidad genética de los HT, puede hacerlos menos vulnerables a la presencia de plagas, enfermedades o situaciones drásticas de estrés ambiental, lo cual confirman Wilson *et al.* (2001) y da Costa *et al.* (2005). En un estudio efectuado en los Valles Altos Centrales de México en el que se emplearon los mismos genotipos ahora estudiados, se observó que los HT presentan similar velocidad de emergencia, vigor, longitud y peso seco de la plántula que los HS (Galicía-Juárez *et al.*, 2016); sin embargo, se desconocen las diferencias entre ambos tipos de híbridos en cuanto a su rendimiento de grano, sus componentes (número de granos por panoja y tamaño de grano) y otras características agronómicas.

Los componentes del rendimiento se rigen por poligenes, por lo que el entender el tipo y la magnitud de la acción génica (aditividad, epistasis, dominancia, entre otros) permiten que el fitomejorador seleccione el método genotécnico apropiado. En el caso del sorgo, la adecuada selección de progenitores que combinen bien y produzcan híbridos deseables son indispensables (Premalatha *et al.*, 2006). En programas de mejoramiento genético es necesario evaluar la aptitud combinatoria general y específica de los progenitores y el grado de heterosis media y superior de las cruzas para que el programa de hibridación sea efectivo y eficiente (Mahdy *et al.*, 2011; Thakare *et al.*, 2014).

El objetivo de la presente investigación fue comparar el comportamiento genético y agronómico de líneas progenitoras, híbridos simples y trilineales de sorgo tolerantes al frío en condiciones de campo con dos ambientes.

II.4 MATERIALES Y MÉTODOS

En Montecillo, Estado de México, en la primavera de 2014 se establecieron dos experimentos: Uno se sembró en condiciones de riego (22 abril) en el cual se evaluaron 67 genotipos: 4 líneas A, 4 líneas B, 4 líneas R, 13 HS y 42 HT; el otro experimento se sembró en condiciones de secano o temporal (21 mayo) e incluyó 62 genotipos: 3 líneas A, 3 líneas B, 4 líneas R, 11 HS y 41 HT. Por limitaciones de semilla hubo siete genotipos que se sembraron en riego pero no en temporal y dos genotipos que se evaluaron en temporal pero no en riego. Galicia-Juárez *et al.* (2016) describen el esquema general de formación de los HS e HT empleados en el presente estudio.

En ambos experimentos la siembra fue manual, en seco, a chorrillo en el fondo del surco, en parcelas de dos surcos separados a 0.90 m y 3.0 m de longitud; la distancia entre plantas fue de 10 cm. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se registró la información de la precipitación y temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales de la estación meteorológica más cercana ubicada en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), a 5 km de Montecillo.

II.4.1 Variables

En 10 plantas representativas y con competencia completa, por parcela, al final de la floración se registraron las variables: altura de planta (ALT, cm), desde la base del tallo al ápice de la panoja; longitud de la panoja (LP, cm), de la base al ápice de la panoja; ancho de la panoja (AP, cm), en la parte más amplia de la panoja; longitud de la excursión (EXC, cm), de la lígula de la hoja bandera a la base de la panoja; y diámetro del tallo (DT, mm), a un tercio de la distancia entre la base del tallo y la hoja bandera. Posteriormente, las panojas se cubrieron con bolsas de papel para protegerlas de los pájaros hasta la cosecha.

La cosecha se efectuó una semana después de la madurez fisiológica de la semilla (presencia de la “capa negra”) (Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006). Las panojas se mantuvieron en una bodega a temperatura ambiente durante dos meses hasta que su peso seco fue constante. Cada panoja se desgranó individualmente y se registró el peso de 100 semillas (PCS, g), peso de semillas por panoja (PSP, g) y número de semillas por panoja (NSP)= 100 x PSP/ PCS. Las variables sometidas al análisis de varianza corresponden al promedio de las 10 plantas por repetición.

II.4.2 Análisis estadísticos

Se efectuó un análisis de varianza (ANAVA) combinado que incluyó cinco grupos de genotipos (líneas A, B, R, HS e HT), dos ambientes (riego y temporal), genotipos/grupo y sus respectivas interacciones. Como cada grupo estuvo representado por diferente número de observaciones, se utilizó el programa PROC GLM de SAS (2002). Se realizó la prueba Tukey ($p \leq 0.05$) para comparar las medias de los tratamientos. En los híbridos simples y trilineales se realizó una correlación de Pearson entre el peso de semilla por panoja y las demás variables.

El análisis estadístico de la ACG y ACE de los híbridos simples y trilineales se hizo mediante una prueba de mestizos con datos del análisis combinado. En los HS las líneas A y en los HT, las cruza simples, fungieron como líneas y en ambos tipos de híbridos las líneas R (machos) como probadores. En los HT se incluyeron aquéllos en los que la versión A actuó como progenitor femenino (cruzas directas) de la crusa simple estéril, más aquéllos en los que la contraparte isogénica B participó como progenitor masculino (cruzas recíprocas) de tal crusa simple (Galicia-Juárez *et al.*, 2016). La ACG de las líneas y probadores se estimó mediante los promedios respectivos; la ACE correspondió a la interacción línea x probador. La comparación de medias de la ACG y ACE de líneas y de probadores dentro de cada tipo de grupo genético se realizó mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

La heterosis media de los híbridos se estimó con base en los resultados del análisis combinado, debido a la ausencia de interacción genotipo por ambiente, mediante la relación del comportamiento de la F1/comportamiento promedio de los progenitores (dos en los HS y tres en los HT) x 100; también se estimó la heterosis superior con base en el comportamiento de la F1/comportamiento del mejor progenitor x 100 (Sattar *et al.*, 2014). En estos cálculos se utilizaron los datos de las líneas B y R pues estas líneas son androfértiles. La heterosis promedio de los HS vs. la de los HT se comparó mediante la prueba de “t” de Student entre las dos medias, con base en un diseño de parcelas no apareadas.

II.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todas las variables, hubo significancia de las fuentes de variación ambientes y grupos, excepto en longitud de panoja (entre ambientes) y peso de 100 semillas (entre grupos). En cambio, la interacción ambientes x grupos solamente fue significativa para altura de planta y diámetro de tallo (Cuadro II.1); es decir, los dos ambientes (riego y temporal) afectaron en igual proporción al comportamiento de los grupos y a los genotipos dentro de grupos [(Gen x Amb)/Grupo]. Este resultado es contrario al reportado por Almeida *et al.* (2014) quienes mencionan que la interacción genotipo x ambiente en híbridos simples de sorgo para grano es una respuesta frecuente; ya que el comportamiento de los híbridos es menos predecible entre ambientes o localidades.

Los genotipos dentro de grupo (Gen/Grupo) de líneas R e híbridos simples y trilineales presentaron efectos significativos para la mayoría de las variables, contrario al grupo de líneas A y B.

Cuadro II. 1 Cuadrados medios del ANAVA combinado para las variables registradas en campo.

F.V.	G.L.	Cuadrados medios							
		ALT	LP	AP	DT	EXC	PCS	PSP	NSP
Ambientes	1	2626.78 **	12.70 ns	237.42 **	867.52 **	10237.31 **	20.38 *	7660.39 **	3798133 **
Rep/Amb	4	33.35	14.62	27.77	13.26	2.44	4.69	91.36	234272
Grupos	4	16876.93 **	225.38 **	245.60 **	25.14 **	408.66 **	4.06 ns	1438.73 **	873659 **
Amb x Grupos	4	430.99 *	6.73 ns	3.76 ns	4.51 *	11.27 ns	0.27 ns	25.38 ns	92886 ns
Gen/Grupo									
A	3	44.98 ns	26.17 **	8.87 *	1.86 ns	22.74 *	0.56 ns	34.99 ns	192867 ns
B	3	52.58 ns	31.03 **	0.71 ns	1.98 ns	63.92 **	0.11 ns	102.93 ns	21815 ns
R	3	1244.33 **	18.14 **	32.61 **	4.79 *	173.41 **	1.24 **	310.92 **	674891 **
HS	14	358.46 **	17.16 **	9.05 **	1.89 ns	112.27 **	0.25 **	96.80 *	98252 *
HT	41	448.18 **	11.53 **	13.18 **	2.68 *	100.10 **	4.49 ns	113.77 **	132170 **
(Gen x Amb)/Grupo									
A	2	4.06 ns	0.69 ns	0.81 ns	7.28 *	2.26 ns	0.06 ns	83.50 ns	70388 ns
B	2	11.43 ns	1.18 ns	0.34 ns	0.11 ns	19.41 *	0.19 ns	77.67 ns	38204 ns
R	3	12.91 ns	1.46 ns	1.01 ns	2.84 ns	8.48 ns	0.11 *	5.93 ns	34867 ns
HS	8	9.97 ns	1.75 ns	2.38 ns	3.07 *	6.13 ns	0.04 ns	51.53 ns	83079 *
HT	40	29.83 ns	1.53 *	2.14 ns	2.33 *	7.26 *	4.29 ns	34.08 ns	42600 ns
Residual	372	96.29	3.41	3.71	1.78	21.25	2.89	45.92	62015
C. V. (%)		7	7	15	10	28	66	22	20

B: Líneas mantenedoras (progenitores masculinos isogénicos de las líneas A); R: Líneas restauradoras de la fertilidad (progenitores masculinos de los HS e HT); ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excersión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de semillas por panoja; NSP: Número de semillas por panoja; * Significancia ($p \leq 0.05$); **Significancia ($p \leq 0.01$); ns: no significativo.

II.5.1 Comparaciones entre ambientes

En el experimento de temporal los genotipos presentaron medias significativamente mayores ($p \leq 0.05$) que en el experimento conducido en riego, en las variables relacionadas con el rendimiento y sus componentes (peso de semilla por panoja, número de semillas por panoja y peso de 100 semillas) en magnitudes que variaron entre 16 y 33 %, así como para ancho de panoja y longitud de la excursión. Solo en diámetro de tallo los genotipos evaluados en riego presentaron mayores valores que en temporal (Cuadro II.2). Los registros climáticos indican que la precipitación pluvial y las temperaturas máximas en el año 2014 fueron superiores al promedio de la década 2000. En particular, la temperatura mínima promedio durante el inicio de la estación de crecimiento del experimento con riego (mayo) fue 9.7 °C, mientras que en el experimento de temporal (junio) fue 12.0 °C, lo cual pudo favorecer el mayor rendimiento del experimento de temporal.

II.5.2 Comparaciones entre grupos

Destaca que no hubo diferencias para peso de semillas por panoja y número de semillas por panoja entre la media del grupo de líneas R y la media del grupo de HS e HT por lo que se confirma que el programa de selección individual y masal aplicado en las líneas restauradoras ha sido efectivo y que es conveniente utilizar algunas de estas líneas como variedades de polinización libre, como sugieren León-Velasco *et al.* (2009a). Al respecto, Cisneros-López *et al.* (2007a) y Galicia-Juárez *et al.* (2016) tampoco encontraron diferencias significativas en calidad fisiológica de la semilla y crecimiento de plántulas entre el grupo de líneas R y los HS adaptados a los Valles Altos Centrales de México. Cabe mencionar que Galicia-Juárez *et al.* (2016) emplearon los mismos materiales genéticos del presente estudio.

Cuadro II. 2 Comparación de medias por ambiente, grupos y líneas progenitoras dentro de grupos de ambos ambientes.

Concepto y (n)	ALT (cm)	LP (cm)	AP (cm)	DT (mm)	EXC (cm)	PCS (g)	PSP (g)	NSP
<u>Ambientes</u>								
Riego (67)	142.1 a	26.4 a	11.9 b	15.2 a	11.6 b	2.4 b	27.1 b	1167 b
Temporal (62)	136.9 a	26.1 a	13.5 a	12.2 b	21.9 a	2.8 a	36.2 a	1368 a
<u>Grupos</u>								
A (7)	98.8 d	22.7 b	8.5 c	13.7 a	8.5 c	2.2 a	19.9 b	915 b
B (7)	106.1 c	22.5 b	8.5 c	11.8 b	14.3 b	1.9 a	19.0 b	1037 b
R (8)	138.3 b	23.6 b	10.7 b	13.9 a	14.1 b	2.5 a	30.4 a	1274 a
HS (24)	145.7 a	27.1 a	13.2 a	14.0 a	16.4 ab	2.5 a	33.5 a	1342 a
HT (83)	144.3 ab	26.9 a	13.5 a	13.8 a	17.6 a	2.7 a	32.9 a	1289 a
<u>Líneas progenitoras dentro de grupos</u>								
GRUPO A								
A1 (2)	98.5 a	25.6 a	7.9 b	13.9 ab	9.6 ab	2.1 a	23.7 a	1107 a
A2 (2)	101.9 a	20.9 b	10.1 a	12.8 b	7.5 b	1.9 a	21.6 a	1082 ab
A3 (1)	92.6 a	22.4 b	8.6 ab	15.9 a	1.9 c	2.6 a	15.7 a	616 b
A5 (2)	99.2 a	21.6 b	7.5 b	13.2 b	11.8 a	2.3 a	16.2 a	698 ab
GRUPO B								
B1 (2)	108.3 a	25.7 a	8.3 a	12.2 a	16.8 a	1.9 a	25.2 a	1294 a
B2 (2)	106.5 a	20.3 c	8.9 a	11.9 a	10.8 b	1.8 a	18.3 a	1086 a
B3 (1)	98.3 a	22.2 b	7.9 a	12.4 a	8.5 b	1.9 a	15.3 a	790 a
B5 (2)	107.4 a	21.6 bc	8.4 a	10.9 a	18.1 a	1.8 a	15.5 a	862 a
GRUPO R								
R14 (2)	157.8 a	24.7 a	12.4 a	12.7 b	21.1 a	2.1 c	20.4 b	995 c
R17 (2)	139.4 b	21.3 c	7.7 c	14.3 ab	9.8 c	3.1 a	31.6 a	1034 c
R19 (2)	124.3 c	25.2 a	12.8 a	14.7 a	15.5 b	2.4 b	32.1 a	1350 b
R25 (2)	131.6 bc	23.1 b	10.2 b	14.2 ab	10.0 c	2.2 bc	37.6 a	1717 a

B: Líneas mantenedoras (progenitores masculinos isogénicos de las líneas A); R: Líneas restauradoras de la fertilidad (progenitores masculinos de los HS e HT); (n): Número de medias incluidas en el análisis; ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excursión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de grano por panoja y NSP: Número de semillas por panoja. Valores con la misma letra en cada columna y dentro de cada tipo de clasificación no son diferentes estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

La media del grupo de híbridos trilineales no presentó diferencias significativas con la media del grupo de híbridos simples para variable alguna (Cuadro II.2), lo que confirma la similitud de respuesta entre ambos tipos de híbridos observada en evaluaciones de campo efectuadas por Walsh y Atkins (1973) y Patanothai y Atkins (1974), así como los reportados para calidad fisiológica de la semilla, en condiciones de invernadero, por Galicia-Juárez *et al.* (2016). Estos resultados sugieren que es factible sembrar híbridos trilineales sin demérito del rendimiento de grano en Valles Altos; sin embargo, la producción de semilla de éstos implica un lote adicional de siembra para producir la cruza A x B no isogénica, lo que aunado a no presentar diferencias significativas en rendimiento de grano implicaría un mayor costo de producción para las empresas semilleras, comparado con los híbridos simples. En este contexto, resalta la importancia de iniciar los trámites para el registro en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales de las líneas restauradoras sobresalientes para su eventual uso como variedades de polinización libre, cuyo precio de semilla sería menor que la de los híbridos.

Las diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los cinco grupos en la mayoría de las variables se atribuyen al menor porte y menor rendimiento de semilla de las líneas A y B. Los grupos de líneas A y B no presentaron diferencias entre sí para longitud de panoja, ancho de panoja, peso de semillas por panoja y número de semillas por panoja lo que confirma su carácter isogénicos; de manera semejante a lo reportado para características relacionadas con la calidad fisiológica de la semilla y crecimiento de plántulas por Cisneros-López *et al.* (2007a) y por Galicia-Juárez *et al.* (2016) quienes evaluaron los mismos pares de líneas A/B del presente estudio.

II.5.3 Comparaciones de genotipos dentro de cada grupo

Las diferencias para rendimiento de semilla y sus componentes entre los cuatro pares A/B no fueron significativas ($p \leq 0.05$); sin embargo, en las variables agronómicas hubo

contrastes; *i.e.*, el par isogénico A1/B1 presentó mayor longitud de panoja y el par A5/B5 mostró la mayor excursión (Cuadro II.2). Es importante señalar que durante el proceso de generación de pares isogénicos A/B se seleccionó hacia un porte bajo, en contraste con la selección hacia porte alto que se aplicó en las líneas R. De esta manera se facilitarían la multiplicación de semilla de los híbridos tolerantes al frío.

Las cuatro líneas restauradoras presentaron diferencias en todas las variables, incluyendo el rendimiento de semilla y sus componentes. Las líneas R17, R19 y R25 no presentaron diferencia en el peso de semilla por panoja el cual superó al de la línea R14.

II.5.4 Comparaciones de los híbridos simples y trilineales dentro de cada grupo

Dentro de los 15 híbridos simples y dentro de los 42 híbridos trilineales también hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables (Cuadro II.3). El rendimiento de los HS fluctuó entre 25.8 y 50.5 g por panoja y de 23.9 a 40.7 g/panoja en los HT. El rendimiento del 20 % superior de los híbridos simples (A1xR17, A1xR19 y A2xR17) fue 42.4 g/panoja y 38.7 g/panoja para similar porcentaje de los híbridos trilineales [(A1xB2)xR17, (A5xB1)xR25, (A3xB1)xR17, (A2xB3)xR17, (A2xB5)xR17, (A2xB3)xR25, (A3xB2)xR17 y (A5xB1)xR17] (Cuadro II.3). Esto indica que hubo HT con rendimiento similar al de los HS, aunque el mejor HT no superó al rendimiento del mejor HS.

Al separar los HS y los HT de mayor rendimiento *vs.* los de menor rendimiento, destaca que en los primeros predomina la línea R17 como restaurador de la fertilidad y en los segundos la línea R14, lo cual anticipa un contrastante grado de ACG de las líneas restauradoras. Esto significa que la contribución genética de las líneas R es importante para la expresión del vigor híbrido, lo que debe considerarse al seleccionar progenitores restauradores en los programas de hibridación de sorgo.

Cuadro II. 3 Comparación de medias de híbridos simples y trilineales dentro de grupos.

Genotipos (n)	ALT (cm)	LP (cm)	AP (cm)	DT (mm)	EXC (cm)	PCS (g)	PSP (g)	NSP
<u>Genotipos dentro del grupo de híbridos simples</u>								
A1xR14 (2)	157.3 a	30.4 a	14.9 ac	14.1 ac	20.5 ac	2.2 bc	31.5 bc	1397 ab
A1xR17 (1)	142.5 bc	29.2 ac	14.0 ad	12.4 c	20.2 ac	2.9 a	50.5 a	1712 a
A1xR19 (1)	143.1 bc	30.2 ab	15.2 ab	12.6 c	24.9 a	2.4 bc	40.1 ab	1709 a
A1xR25 (2)	140.7 bc	28.2 ad	11.9 bd	14.5 ac	10.5 fg	2.4 ac	35.6 bc	1466 ab
A2xR14 (2)	155.5 a	26.3 cf	13.7 ad	13.2 bc	17.8 bd	2.2 c	28.1 bc	1285 ab
A2xR17 (2)	143.1 bc	24.3 f	11.9 cd	14.6 ac	14.4 de	2.6 ac	36.6 ac	1392 ab
A2xR19 (1)	138.9 bc	27.5 ad	13.3 ad	15.7 ab	16.3 ce	2.2 bc	25.8 c	1194 b
A2xR25 (1)	137.4 bc	25.4 df	11.8 cd	15.6 ab	2.3 h	2.2 bc	31.6 bc	1412 ab
A3xR14 (2)	156.2 a	27.4 bc	14.1 ad	13.5 bc	17.8 bd	2.4 bc	30.1 bc	1268 ab
A3xR17 (1)	146.7 ab	25.5 df	12.2 bd	15.1 ac	12.6 eg	2.6 ac	35.8 bc	1411 ab
A3xR19 (1)	137.9 bc	27.9 ad	14.5 ad	16.6 a	8.8 g	2.8 ab	28.5 bc	1027 b
A5xR14 (2)	155.9 a	28.6 ac	15.5 a	12.6 c	24.8 a	2.5 ac	27.6 bc	1126 b
A5xR17 (2)	142.8 bc	25.4 df	11.5 d	13.7 bc	17.7 bd	2.8 ab	35.3 bc	1277 ab
A5xR19 (2)	139.2 bc	27.1 cf	12.3 ad	13.9 bc	21.9 ab	2.8 ab	32.7 bc	1184 b
A5xR25 (2)	133.8 c	24.8 f	12.1 bd	14.2 ac	9.8 fg	2.6 ac	36.3 bc	1443 ab
<u>Diez híbridos trilineales superiores en peso de semilla por panoja</u>								
(A1xB2)xR17	143.1 ej	26.3 fo	12.3 fk	14.9 ab	16.0 ah	2.7 af	40.7 a	1489.9 ab
(A5xB1)xR25	140.3 hk	26.2 go	11.5 ik	14.3 ab	11.3 fh	2.8 ac	40.4 ab	1419.8 ac
(A3xB1)xR17	148.9 ah	27.5 aj	13.2 ck	13.5 ab	19.8 af	2.7 ae	38.7 ac	1421.2 ac
(A2xB3)xR17	140.1 hk	26.1 go	12.7 ek	14.3 ab	16.2 ah	2.8 ae	38.3 ad	1392.0 ad
(A2xB5)xR17	140.6 gk	25.1 jo	12.9 dk	14.9 ab	17.3 ah	2.7 ag	38.1 ad	1406.3 ad
(A2xB3)xR25	133.7 jk	25.7 io	13.2 ck	14.4 ab	9.3 gh	2.5 ch	37.4 ae	1512.0 ab
(A3xB2)xR17	145.4 cj	24.2 jo	13.2 ck	14.4 ab	9.3 gh	2.5 ch	37.0 af	1512.0 ab
(A5xB1)xR17	147.1 bi	26.7 dn	12.2 gk	14.1 ab	16.1 ah	2.7 ag	37.0 af	1367.2 ad
(A5xB2)xR17	139.7 hk	24.8 jo	10.8 k	15.6 ab	12.6 dh	2.7 ag	36.6 af	1362.6 ae
(A3xB1)xR25	136.1 ik	27.4 ak	13.4 bk	15.8 a	12.9 dh	2.7 af	36.6 af	1341.3 af
<u>Diez híbridos trilineales inferiores en peso de semilla por panoja</u>								
(A1xB2)xR14	156.9 ac	28.8 ad	14.4 ag	13.6 ab	20.5 ae	2.3 eh	29.7 bi	1303.9 af
(A5xB1)xR14	156.8 ac	29.3ab	16.9 a	13.1 ab	23.9 a	2.3 fh	29.6 ci	1289.2 af
(A3xB2)xR19	134.3 jk	27.2 bk	13.8 bi	13.1 ab	19.3 af	2.8 ac	27.8 di	994.7 f
(A1xB5)xR14	160.4 a	29.2 ac	15.3 ae	13.3 ab	24.3 a	2.3 dh	27.6 di	1171.6 bf
(A1xB3)xR14	155.4 ae	29.6 a	16.1 ab	13.7 ab	21.1 ad	2.5 bh	27.5 di	1090.9 cf
(A2xB5)xR14	155.6 ad	26.5 dn	13.1 ck	13.6 ab	18.6 af	2.4 ch	26.7 ei	1100.9 cf
(A3xB1)xR14	160.5 a	28.7 ae	15.7 ac	14.0 ab	22.9 a	2.6 ah	26.2 fi	1056.3 df
(A3xB5)xR14	152.9 ag	28.3 ag	15.6 ac	13.1 ab	23.1 a	2.5 ch	25.3 gi	1077.8 cf
(A5xB3)xR14	158.4 ab	27.6 aj	14.9 af	12.7 ab	23.9 a	2.5 bh	24.9 hi	1002.7 ef
(A2xB3)xR14	156.8 ac	27.1 bk	15.1 ae	12.5 b	22.0 ac	2.3 gh	23.9 i	1053.4 df

(n): Número de medias incluidas en el análisis; ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excursión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de grano por panoja y NSP: Número de semillas por panoja. Valores con la misma letra en cada columna y dentro de cada tipo de clasificación no son diferentes estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

De acuerdo con estos resultados existen nuevas opciones de producción de sorgo mediante la siembra de híbridos simples de altos rendimientos, además de emplear líneas R como variedades de polinización libre adaptadas a los Valles Altos Centrales de México. La recomendación final dependerá de los estudios financieros de los costos de producción del híbrido o variedad que satisfagan las expectativas de los productores y empresas semilleras.

II.5.5. Correlaciones

En ambos tipos de híbridos las variables que más se asociaron con el peso de semillas por panoja fueron el peso de cien semillas y número de semillas por panoja, con valores de correlación entre 0.41** y 0.86** (Cuadro II.4) lo que ratifica que ambas variables son las principales componentes del rendimiento de grano en sorgo (Maman *et al.*, 2004). De ahí, la importancia de identificar progenitores que satisfagan ambos atributos en los programas de hibridación.

Cuadro II. 4 Coeficientes de correlación de Pearson para peso de semillas por panoja en híbridos simples y trilineales.

	ALT	LP	AP	DT	EXC	PCS	NSP
PSP (HS)	-0.4 **	0.08 ns	0.2 ns	-0.32 **	0.27 *	0.61 **	0.86 **
PSP (HT)	-0.41 **	-0.25 **	-0.02 ns	-0.23 **	0.18 **	0.41 **	0.75 **

PSP: Peso de semillas por panoja en híbridos simples (HS) y en híbridos trilineales (HT); ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excersión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de grano por panoja y NSP: Número de semillas por panoja. * Significancia ($p \leq 0.05$); **Significancia ($p \leq 0.01$); ns: no significativo.

II.5.6 Aptitud combinatoria general y específica

En los dos tipos de híbridos, las estimaciones de ACG de las líneas y de los probadores presentaron efectos significativos ($p \leq 0.05$) para la mayoría de las variables, en consecuencia, solamente se presentan los resultados de los híbridos simples (Cuadro II.5).

Cuadro II. 5. Cuadrados medios de los ANAVA combinados de líneas y probadores en las variables evaluadas en híbridos simples.

F. V.	GL	Cuadrados medios							
		ALT	LP	AP	DT	EXC	PCS	PSP	NGP
Línea	3	124.4 *	45.2 **	5.5 ns	4.5 ns	102.4 *	0.33 **	127.5 ns	244084 **
Probador	3	1362.4 **	28.5 **	27.3 **	10.7 *	567.4 **	0.63 **	295.4 **	126838 ns
Lin x Pro	8	15.7 ns	2.3 ns	3.8 ns	3.7 ns	27.6 ns	0.10 ns	57.9 ns	66999 ns
Error	56	34.4	1.7	3.5	3.6	31.3	0.06	50.4	54024
C. V. (%)		4	5	14	14	34	10	21	17

ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excursión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de grano por panoja y NSP: Número de semillas por panoja. * Significancia ($p \leq 0.05$) **; Significancia ($p \leq 0.01$); ns: no significativo.

Entre las líneas, la línea A1 destacó por sus mayores valores de ACG para las variables LP, EXC, PSP y NGP. Entre los probadores, la línea R14 presentó los mejores valores en las variables ALT, LP, AP, DT y EXC, y la línea R17 para rendimiento de semilla y sus componentes (PCS, PSP y NGP) (Cuadro II.6).

Cuadro II. 6 Aptitud combinatoria general de líneas y probadores en híbridos simples, promedio de riego y temporal.

	ALT	LP	AP	DT	EXC	PCS	PSP	NGP
Líneas								
A1	145.90 a	29.52 a	14.04 a	13.39 a	19.00 a	2.50 ab	39.40 a	1571 a
A2	143.75 a	25.89 b	12.67 a	14.76 a	12.70 b	2.32 b	30.53 b	1321 b
A3	146.96 a	26.98 b	13.58 a	15.04 a	13.04 b	2.58 a	31.49 b	1235 b
A5	142.94 a	26.47 b	12.83 a	13.60 a	18.58 a	2.65 a	32.96 ab	1257 b
Probadores								
R14	156.24 w	28.20 w	14.56 w	13.32 w	20.20 w	2.31 x	29.32 x	1269 w
R17	143.79 x	26.12 x	12.41 xy	13.92 w	16.21 w	2.74 w	39.55 w	1448 w
R19	139.80 xy	28.19 w	13.80 wx	14.67 w	17.98 w	2.54 wx	31.77 x	1278 w
R25	137.31 y	26.13 x	11.94 y	14.81 w	7.55 x	2.41 wx	34.50 wx	1440 w

ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excursión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de semilla por panoja y NSP: Número de semillas por panoja. Valores con la misma letra en cada columna dentro de líneas o dentro de probadores no son diferentes estadísticamente (Tukey, $p \leq 0.05$).

La interacción línea x probador (estimador de la ACE) no fue significativa, lo que significa que todas las líneas evaluadas que fungieron como progenitor femenino (A/B en HS y AxB no isogénica, en HT) son categorizadas en igual forma por cada uno de los machos (líneas R), de tal manera que los probadores identifican las mismas mejores líneas. Hallauer y López (1979) indican que el rendimiento del mestizo de una línea estima la ACG de ésta; por tanto las diferencia de rendimiento entre mestizos estiman las diferencias entre la ACG de sus líneas.

Galicia-Juárez *et al.* (2016), con los mismos genotipos aquí evaluados, indican que los mayores valores de ACG de los híbridos simples correspondieron a la línea A2 para plántulas

normales y velocidad de emergencia y los probadores R14 y R25 en velocidad de emergencia. Esto significa que las variables asociadas con el crecimiento inicial de plántulas no necesariamente están relacionadas con las características de planta adulta.

De acuerdo con Antuna *et al.* (2003), los efectos de ACG están relacionados con los genes de efectos aditivos y los de ACE con los de efectos de dominancia y epistáticos de las cruzas, por lo que el desarrollo de líneas y la identificación de los mejores híbridos determinan el éxito de un programa de mejoramiento genético. Cuando en una población los efectos de aptitud combinatoria general son más importantes que los específicos es recomendable mejorar a la población mediante métodos de selección recurrente (Hausmann *et al.*, 2012).

II.5.7. Heterosis

La heterosis media fue de magnitud semejante entre ambos tipos de híbridos excepto en ancho de panoja y peso de cien semillas, donde fue mayor en los HT (Cuadro II.7), lo que significa que la mayor heterocigosis de los HS respecto a los HT, no se traduce en una mayor heterosis, en este grupo de progenitores adaptados a los Valles Altos.

Cuadro II. 7 Estimaciones de heterosis media y superior de los híbridos simples vs. híbridos trilineales para las variables agronómicas estudiadas.

Tipo de híbrido (n)	ALT	LP	AP	DT	EXC	PCS	PSP	NSP
<u>Heterosis media</u>								
HS (n=15)	119 a	118 a	139 b	110 a	112 a	116 b	140 a	121 a
HT (n=42)	124 a	118 a	147 a	110 a	128 a	126 a	149 a	120 a
<u>Heterosis superior</u>								
HS (n=15)	105 a	112 a	123 a	101 a	95 a	103 a	114 a	108 a
HT (n=42)	104 a	111 a	125 a	99 a	99 a	107 a	109 a	101 a

HS: Híbridos simples, HT: Híbridos trilineales; n: Número de genotipos involucrados en el promedio; ALT: Altura de planta; LP: Longitud de la panoja; AP: Ancho de la panoja; DT: Diámetro del tallo, EXC: Longitud de la excursión; PCS: Peso de 100 semillas; PSP: Peso de semilla por panoja; NSP: Número de semillas por panoja. Valores con la misma letra en cada columna y tipo de heterosis, no son diferentes estadísticamente (*t* de Student, $p \leq 0.05$).

Los valores de heterosis superiores fueron menores que la heterosis media debido a que las características agronómicas de las líneas restauradoras no fueron superadas por la mayoría de los híbridos.

Los valores de heterosis media (40 %) y superior (14 %) obtenidos en la presente investigación para peso de semillas por panoja en los HS, se encuentran en los intervalos observados por otros investigadores que utilizaron genotipos de similar adaptación: 29% y 24% (Osuna-Ortega *et al.*, 2000); 35 y 22 % (Cisneros-López *et al.*, 2007b) y 47 y 23% (León-Velasco *et al.*, 2009b), para heterosis media y superior, respectivamente.

Hausmann *et al.* (2000) mencionan que las estimaciones promedio de nueve estudios para heterosis media de rendimiento de grano variaron entre 13 a 88 %, donde los valores más bajos provienen de cruzas entre líneas parentales adaptadas, mientras que las estimaciones altas corresponden a estudios que implican germoplasma exótico o que se llevaron a cabo en condiciones de estrés ambiental.

En estudios más recientes se presentan rangos de heterosis media de 3.9 a 55.4 % para peso de grano/panoja, y de 3.2 a 19.8 % para peso de 100 semillas; con valores de heterosis superior que fluctuaron de 5.1 a 34.7 % y 5.6 a 18.24 %, respectivamente (Jain y Patel, 2013). Ringo *et al.* (2015) reportan valores de heterosis de 81.9 % y de heterosis superior de 77.2 % para peso de grano/panoja.

II.6 CONCLUSIONES

Se confirma que en sorgo, los híbridos simples y trilineales tienen un similar desempeño genético y agronómico. Algunas líneas restauradoras (R) mostraron rendimientos de grano similares a los mejores híbridos, por lo que se podrían utilizar como variedades de polinización libre.

Las líneas isogénicas A1/B1 y la línea restauradora R25 presentaron el mayor peso y número de semillas por panoja, los cuales fueron los principales componentes del rendimiento

de semilla en este estudio.

La línea androestéril A1 y la línea restauradora R17 presentaron los mejores valores de ACG para rendimiento tanto en híbridos simples como en trilineales.

II.7 LITERATURA CITADA

Almeida, F. J. E., Dessaune, T. F., Vilela, R. M. D., Fonseca, S. F., Correia, G. S. I. and Beserra, M. C. 2014. Genetic evaluation of grain sorghum hybrids in Brazilian environments using the REML/BLUP procedure. *Scientific Agriculture* 71: 146-150.

Antuna, G. O., Rincón, S. F., Gutiérrez, R. E., Ruiz, T. N. A., Bustamante, G. L. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26: 11-17.

Cisneros-López, M. E., Mendoza-Onofre, L. E., Mora-Aguilera, G., Córdova-Téllez, L., and Livera-Muñoz, M. 2007a. Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Seed quality and its effects on seedling establishment. *Agrociencia* 41: 45-55.

Cisneros-López, M. E., Mendoza-Onofre, L. E., Mora-Aguilera, G., Córdova-Téllez, L. and Livera-Muñoz, M. 2007b. Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. II: *Fusarium verticilloides* (Sacc.) Nirenberg effects on seed yield and its components under field conditions. *Agrociencia* 41: 283-294.

da Costa, V. R., Casela, R. C., Zambolim, L., Santos, G. F. and do Vale, R. X. F. 2005. Evaluation of genetic mixtures of sorghum lines for anthracnose resistance management. *Fitopatología Brasileira* 30: 525-526.

FAO. 2016. Estadísticas de producción agropecuaria. Sorgo. Roma (IT). Disponible en <http://faostat.fao.org>

Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero (FND). 2014. Panorama del Sorgo. SIAP-SAGARPA.

Galicia-Juárez, M., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Cisneros-López, M. E, Benítez Riquelme I. and Córdova-Téllez, L. 2016. Heterosis and combining ability of seed physiological quality traits of single cross vs. three-way sorghum hybrids. *Acta Scientiarum. Agronomy* (aprobado).

Hallauer, A. R. and Lopez, P. E. 1979. Comparison among testers for evaluating lines of corn. *Proceedings Annual Hybrid Corn Industry Research Conference. American Seed Trade Association* 34: 57-75.

Hausmann, G. I. B., Obilana, B. A., Ayiecho, O. P., Blum, A., Schipprack, W. and Geiger, H. H. 2000. Yield and yield stability of four population types of grain sorghum in a semi-arid area of Kenya. *Crop Science* 40: 319-329.

Hausmann, G. I. B., Rattunde, F. H., Weltzien-Rattunde, E., Traoré, C. S. P., Brocke, V. K. and Parzies, K. H. 2012. Breeding strategies for adaptation of pearl millet and sorghum to climate variability and change in West Africa. *Journal Agronomy & Crop Science* 198: 327-339.

Jain, K. S. and Patel, R. P. 2013. Heterosis studies for yield and its attributing traits in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Forage Research* 39: 114-117.

Jowett, D. 1972. Yield stability parameters for sorghum in East Africa. *Crop Science* 12: 314-317.

Kenga, R., Alabi, S. O., and Gupta, S. C. 2004. Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Field Crops Research* 88: 251-260.

León-Velasco, H., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo-González, F., Cervantes-Santana, T. and Martínez-Garza, A. 2009a. Evaluation of two generations of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Genetic variability and adaptability. *Agrociencia* 43: 483-496.

León-Velasco, H., Mendoza-Onofre, L. E., Castillo-González, F., Cervantes-Santana, T. and Martínez-Garza, A. 2009b. Evaluation of two generations of cold tolerant sorghum

hybrids and parental lines. II: Combining ability, heterosis and heterobeltiosis. *Agrociencia* 43: 609-623.

Mahdy, E. E., Ali, M. A. and Mahmoud, A. M. 2011. The effect of environment on combining ability and heterosis in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Asian Journal Crop Science* 3: 1-15.

Maman, N., Mason, C. S., Lyon, J. D. and Dhungana, P. 2004. Yield components of pearl millet and grain sorghum across environments in the Central Great Plains. *Crop Science* 44: 2138-2145.

Osuna-Ortega, J., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Castillo González, F., Mendoza-Castillo, M. del C., and Williams-Alanís, H. 2000. Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México. I: High Valleys. *Agrociencia* 34: 561-572.

Patanothai, A. and Atkins, R. E. 1974. Yields stability of single crosses and three-way hybrids of grain sorghum. *Crop Science* 14: 287-290.

Premalatha, N., Kumaravadivel, N. and Veerabhadhiran, P. 2006. Heterosis and combining ability for grain yield and its components in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Indian Journal Genetics* 66(2): 123-126.

Ringo, J., Onkware, A., Mgonja, M., Deshpande, S., Rathore, A., Mneney, E. and Gudu, S. 2015. Heterosis for yield and its components in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) hybrids in dry lands and sub-humid environments of East Africa. *Australian Journal Crop Science* 9: 9-13.

Ross, W. M. 1969. Performance of three-way sorghum hybrids. *Proceedings Annual Corn-Sorghum Research Conference. American Seed Trade Association.* 24: 129-134.

Sattar, T. A., Akram, Z., Shabbir, G., Saifullah, K. K. and Shahid, I. M. 2014. Heterosis and combining ability studies for quantitative traits in fodder sorghum (*Sorghum bicolor* L.).

Journal Agricultural Research 3: 329-337.

Thakare, D. P., Ghorade, R. B. and Bagade, A. B. 2014. Combining ability studies in Grain Sorghum using line X tester analysis. International Journal Current Microbiology and Applied Science 3: 594-603.

USDA. 2016. Foreign Agricultural Service's Production, Supply and Distribution (PSD) Online. World Sorghum Production, consumption and Stocks. Consultado el 29 de septiembre de 2016. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/>

Valadez-Gutiérrez, J., Mendoza-Onofre, L. E., Vaquera-Huerta, H., Córdova-Téllez, L., Mendoza-Castillo, Ma. del C. and García-de los Santos, G. 2006. Flowers thinning, seed yield and post-anthesis dry matter distribution in sorghum. Agrociencia 40: 303-314.

Walsh, E. J. and Atkins, R. E. 1973. Performance and within-hybrid variability of three-way and single crosses of grain sorghum. Crop Science 13: 267-271.

Wilson, J. P., Gates, R. N. and Panwar, M. S. 2001. Dynamic multiline population approach to resistance gene management. Phytopathology 91: 255-260.

**CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN FENOTÍPICA DE LÍNEAS MANTENEDORAS
(LÍNEAS B) DE SORGO GRANÍFERO TOLERANTES AL FRÍO[†]**

**PHENOTYPIC DESCRIPTION OF COLD TOLERANT SORGHUM MAINTAINER
LINES (B LINES)**

Los Valles Altos Centrales de México (cerca de 1.5 millones de hectáreas) comprenden áreas agrícolas que se ubican entre 1800 y 2300 msnm, en las que prevalecen temperaturas mínimas mensuales cercanas a 8 °C durante la estación de crecimiento. En esta región no existen siembras comerciales de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) pues las variedades e híbridos disponibles no producen grano en esas condiciones ya que las bajas temperaturas causan androesterilidad ecológica (Livera y Carballo, 1985). Esta situación prevalece a pesar de que en el entonces Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas se generaron tres variedades de sorgo granífero adaptadas a esa región (Romo y Carballo, 1980) cuyo principal criterio agronómico de selección fue la tolerancia al frío (TF) medida en el porcentaje de grano en panojas autofecundadas.

Como parte del proyecto de desarrollo de híbridos de sorgo tolerantes al frío del Colegio de Postgraduados (CP), se generaron líneas mantenedoras (líneas de respuesta B) adaptadas a esas condiciones ecológicas (Mendoza-Onofre, 1992).

[†]: **Versión en el formato requerido por la Revista Fitotecnia Mexicana, donde se ha iniciado el proceso editorial en la sección de NUEVAS VARIETADES, con leves cambios. Cabe señalar que con fecha 30 de septiembre, el SNICS otorgó los números provisionales de registro CNVV a las líneas aquí descritas.**

El proyecto se inició en el año 1980, con la donación al CP de 250 accesiones de India y África, con niveles variables de tolerancia al frío, procedentes del Instituto Internacional de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT) por conducto del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Las accesiones de mejor aspecto agronómico se cruzaron con líneas androestériles [líneas A; sistema CMS-A₁ (Milo-Kafir), susceptibles al frío, donadas al CP por la Universidad de Nebraska (USA)].

Solamente cinco accesiones presentaron respuesta mantenedora (potenciales líneas B), de las que se derivaron sus respectivas líneas A isogénicas mediante retrocruzamientos. En este caso, la esterilidad masculina es el resultado de genes citoplásmicos, heredados en el citoplasma materno de la línea A y la línea B es su isogénica pero con citoplasma normal que carece de genes restauradores en el núcleo, por lo cual, la cruce A x B permite mantener o incrementar la línea A, por lo que la F1 es androestéril (Flores-Naveda *et al.*, 2013). Al final del proceso se obtuvieron líneas A y B tolerantes al frío a las que se designó como “primera generación” (Osuna-Ortega *et al.*, 2001, 2003). En 1986 se hicieron los cruzamientos posibles, mediante emasculaciones manuales, entre las cinco líneas B y a partir de la F2 se inició selección por pedigrí durante seis ciclos para generar nuevas líneas B TF, así como sus correspondientes líneas A isogénicas, a las que se denominó “segunda generación” (León-Velasco *et al.*, 2009). De este grupo se seleccionaron cuatro líneas B de la que ahora son motivo de la presente descripción y que se identifican con las denominaciones CP-TF B1, CP-TF B2, CP-TF B3 y CP-TF B5.

La línea CP-TF B1 tiene la genealogía: {[L2AxBT100-3-1-2-1-2) RC5] x BTF1} - Sel 1; la CP-TF B2 corresponde a {[L2AxBT100-2-2-2-1-3) RC1] x BTF4} - Sel 2; la línea CP-TF B3 es resultado de {[BT100-3-1-2-1-2x BTF15) RC3] x BTF6} - Sel 3, y la línea CP-TF B5 procede de {[BT110-1-1-2-4-3x BTF14) RC3] x BTF9} - Sel 5.

Estas líneas B han mostrado buena adaptación en localidades ubicadas en los Valles Altos Centrales de México. En evaluaciones conducidas en tres localidades del Estado de México (Santa Lucía, Tecámac y Montecillo), su rendimiento de semilla promedio por panoja fue de 24 g en riego y 8 g en secano (León-Velasco *et al.*, 2009). En el año 2014, en Montecillo, el rendimiento promedio de las líneas osciló entre 15 y 25 g por panoja (Cuadro III.1) en dos fechas de siembra. El carácter de tolerancia al frío (más de 90 % de grano en panojas autofecundadas) de estas líneas ha resultado estable en evaluaciones efectuadas en ambientes tan contrastantes como Celaya, Gto., Río Bravo, Tams. (Osuna-Ortega *et al.*, 2003) y en varias localidades y fechas de siembra en Montecillo, México (Mendoza-Onofre *et al.*, 2006; León-Velasco *et al.*, 2009).

Cuadro III. 1 Variables morfológicas del grupo de líneas CP-TF B. Datos promedio de dos ambientes.

Genotipo	EP [†] (días)	AP [†] (cm)	DT [†] (mm)	LH [†] (cm)	AH [†] (cm)	LP [†] (cm)	LE [†] (cm)	PMS [†] (g)	PSP ^{††} (g)
CP-TF B1	70	100	13.8	55	6.0	28.0	7.8	18.4	25.1
CP-TF B2	75	99	12.6	52	6.0	23.1	5.3	19.5	18.3
CP-TF B3	64	95	14.2	54	6.2	26.4	4.1	23.8	15.2
CP-TF B5	68	100	11.8	50	4.8	23.5	12.1	23.1	15.5
VA-110	86	101	15.6	54	5.4	19.2	2.3	19.4	18.5

EP: Emergencia de la panoja; AP: Altura de planta; DT: Diámetro de tallo; LH: Largo de la 3^a hoja; AH: Ancho de la 3^a hoja; LP: Longitud de la panoja; LE: Longitud de excursión; PMS: Peso de mil semillas; PSP: Peso de semilla por panoja. [†]Los dos ambientes fueron: Agua Blanca, Municipio de Villa Juárez, Sonora (ciclo OI-2014) y Montecillo, Edo. de México (ciclo PV-2014). ^{††}Los dos ambientes fueron fechas de siembra en el ciclo PV-2014, en Montecillo, Edo de México.

La descripción fenotípica de estas líneas se efectuó con base en los descriptores de sorgo emitidos por la Unión de Productores y Obtentores de Variedades (UPOV). La información, con excepción del peso de semilla por panoja, se obtuvo en condiciones de riego en dos localidades. La primera, en Montecillo, Edo de México (19° 29' N y 98° 54' O, 2250 m de

altitud) durante el ciclo P-V 2014 y la segunda en el ciclo O-I 2014 en Agua Blanca, Municipio de Villa Juárez, Sonora (26° 58' N y 109° 43' O 20 m de altitud). En ambos ambientes se empleó a la variedad de polinización libre VA-110 como testigo (Cuadro III.1). Con fecha 29 de julio del año en curso se inició el trámite ante SNICS para solicitar el título de obtentor y la inscripción en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales.

El tipo de planta del grupo de líneas mantenedoras contrasta ampliamente con el de VA-110. Las líneas B no presentan pigmentación de antocianinas en las láminas foliares; la planta presenta de uno a dos macollos, los cuales se desarrollan hasta después de la antesis; el color del follaje es verde medio; son insensibles al fotoperiodo; las espiguillas no presentan aristas o ésta es corta; las glumas son largas y cubren aproximadamente 75 % de la semilla; el color del grano es cremoso opaco; la presencia de taninos en el grano es escasa o ausente; el endospermo predominante es farináceo en $\frac{3}{4}$ partes.

Las diferencias particulares de cada línea B se observan en el Cuadro III.1 y la Figura III.1 ilustra panojas representativas. En cambio, VA-110 tiene coleoptilo pigmentado; presenta aristas en la lema; la gluma es de color café oscuro en madurez; el color de grano es marrón rojizo, con taninos y endospermo 100 % harinoso.

Las líneas mantenedoras presentan buena tolerancia al ergot (*Claviceps africana*) (Hernández-Martínez *et al.*, 2002; Mendoza-Onofre *et al.*, 2006); y al tizón de la panoja y pudrición del tallo [*Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg] (Cisneros-López *et al.*, 2007). En condiciones tropicales (Tizimín, Yucatán; 21° 08' N 88°09', 20 m de altitud, durante el ciclo OI (diciembre-enero) resultaron moderadamente tolerantes a la roya (*Puccinia sorghi*), y en las siembras de PV (mayo-junio) fueron susceptibles a la antracnosis (*Colletotrichum graminícola*).

El cruzamiento entre las contrapartes androestériles (líneas A) de estas cuatro líneas y líneas restauradoras adaptadas a las regiones sorgueras tradicionales (*i.e.*, Tamaulipas y El

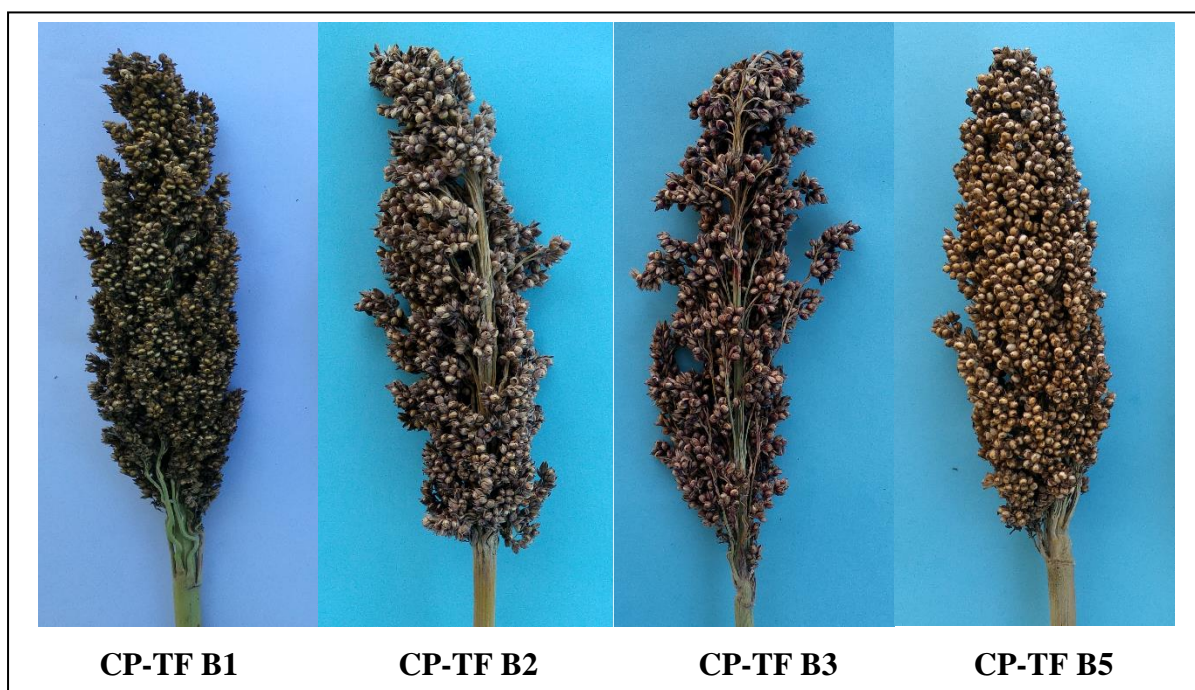


Figura III. 1 Panojas representativas de las líneas mantenedoras de sorgo tolerantes al frío.

Bajío) generan híbridos precoces de alto rendimiento de grano lo cual permite ampliar la adaptación y adaptabilidad de esta especie en México (Osuna-Ortega *et al.*, 2001).

La semilla original está disposición de los interesados en el Campus Montecillo del Colegio de Posgraduados. Se agradece el apoyo de los estudiantes becarios mexicanos del CONACYT, que han participado en este proyecto, así como del M. C. Julián Barrera Sánchez y su equipo de trabajo en Valle del Yaqui, Sonora y Tizimín, Yucatán, México por las facilidades brindadas para completar la descripción varietal.

BIBLIOGRAFÍA

Cisneros-López, M. E., L. E. Mendoza-Onofre, G. Mora-Aguilera, L. Córdova-Téllez y M. Livera-Muñoz (2007) Híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. I: Calidad de la semilla y su influencia en el establecimiento de plántulas. *Agrociencia* 41: 45–55.

- Flores-Naveda, A., C. G. S. Valdés-Lozano, F. Zavala-García, E. Olivares-Sáenz, A. Gutiérrez-Díez y M. E. Vázquez Badillo (2013)** Comportamiento agronómico de líneas para la producción de semilla de sorgo. *Agronomía Mesoamericana* 24: 111-118.
- Hernández-Martínez, M., L. E. Mendoza-Onofre, P. Ramírez-Vallejo, S. Osada-Kawasoe, E. Cárdenas-Soriano and F. Zavala-García (2002)** Response of sorghum B and R lines to ergot (*Claviceps africana*) at Celaya, Guanajuato, México. *In*: Leslie, J. F. (ed.) Sorghum and Millets Diseases. Iowa State Press. Iowa, Manhattan, Kansas. USA. pp: 83-85.
- Livera M., M y A. Carballo C. (1985)** Ampliación de las áreas de adaptación del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). I: Análisis del potencial productivo de genotipos tolerantes al frío en los Valles Altos. *Fitotecnia* 7: 96-113.
- León-Velasco, H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana y A. Martínez-Garza (2009)** Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. II: Aptitud combinatoria, heterosis y heterobeltiosis. *Agrociencia* 43: 486-493.
- Mendoza-Onofre, L. E. (1992)** Grain of first cold tolerant sorghum hybrids developed in Mexico. *Sorghum Newsletter* 33:62.
- Mendoza-Onofre, L. E., M. Hernández-Martínez, E. Cárdenas-Soriano y P. Ramírez-Vallejo (2006)** El germoplasma de sorgo tolerante al frío como fuente potencial de tolerancia al ergot (*Claviceps africana* Frederickson, Mantle & de Milliano). *Agrociencia* 40: 593-603.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, V. A. González-Hernández, M. del C. Mendoza-Castillo, H. Williams-Alanís y M. Hernández-Martínez (2001)** Potencial del germoplasma tolerante al frío en la adaptación y

adaptabilidad del sorgo granífero en México: II. Río Bravo, Tamaulipas; y Celaya, Guanajuato. *Agrociencia* 35: 625-636.

Osuna-Ortega, J., M. del C. Mendoza-Castillo and L. E. Mendoza-Onofre (2003) Sorghum cold tolerance, pollen production and seed yield in Central High Valleys of Mexico. *Maydica* 48:125-132.

Romo C., E. y A. Carballo C. (1980). Características de tres variedades de sorgo para los Valles Altos. Circular CIAMEC 130. INIA-SARH. Chapingo, México. 11 p.

**CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN FENOTÍPICA DE LÍNEAS RESTAURADORAS
(LÍNEAS R) DE SORGO GRANÍFERO TOLERANTES AL FRÍO[†]**

**PHENOTYPIC DESCRIPTION OF COLD TOLERANT RESTORER SORGHUM
LINES (R LINES)**

En los Valles Altos Centrales de México no hay siembras comerciales de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) pues las variedades e híbridos disponibles no producen grano en esas condiciones ya que las bajas temperaturas (entre 5 y 12° C) que prevalecen antes de la floración provocan que el polen sea estéril (Livera y Carballo, 1985). Esas temperaturas se presentan incluso en regiones donde se cultiva comercialmente el sorgo, lo que favorece la incidencia del cornezuelo (*Claviceps africana*) (Hernández-Martínez *et al.*, 2002). Los esfuerzos por generar sorgos adaptados a los Valles Altos tolerantes al frío (que produzcan al menos 90 % de grano en panojas autofecundadas) fructificaron con la liberación de tres variedades de polinización libre por el entonces Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (Romo y Carballo, 1980). De esas variedades, solamente VA-110 se mantuvo en el mercado por unos pocos años.

Con el propósito de iniciar un proyecto de desarrollo de híbridos de sorgo tolerantes al frío, en el Colegio de Postgraduados (CP) fue necesario generar líneas restauradoras de la

[†]: **Versión en el formato requerido por la Revista Fitotecnia Mexicana, donde se ha iniciado el proceso editorial en la sección de NUEVAS VARIEDADES, con leves cambios. Cabe señalar que con fecha 30 de septiembre, el SNICS otorgó los números provisionales de registro CNVV a las líneas aquí descritas.**

fertilidad (líneas R) para lo cual se emplearon diversos métodos de fitomejoramiento genético como: aplicación de agentes mutagénicos, hibridación manual y selección familiar e individual en generaciones segregantes. El proyecto inició en el año 1980, cuando el Instituto Internacional de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT), a través del Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT), donaron al CP 250 accesiones de India y África, con niveles variables de tolerancia al frío (porcentaje de formación de grano en panojas autofecundadas).

Las accesiones con mayor grado de tolerancia al frío se cruzaron con líneas androestériles [líneas A; sistema CMS-A₁ (Milo-Kafir), susceptibles al frío, donadas al CP por la Universidad de Nebraska (USA)]. La mayoría de las accesiones presentaron respuesta restauradora, es decir son capaces de restaurar la fertilidad en la F₁ de la cruce A x R (Flores-Naveda *et al.*, 2013). Las accesiones de mejor aspecto agronómico se sometieron a diversos ciclos de selección individual; en otros casos se generó nueva variabilidad mediante agentes mutagénicos físicos o químicos, y se aplicó selección por pedigrí en las generaciones recombinantes hasta lograr la uniformidad deseada, y periódicamente se verificó que se conservara el carácter de restauración de la fertilidad.

En evaluaciones de campo efectuadas en los años 1990 a 2010 se observó que el rendimiento de grano y las características agronómicas de tipo de planta, precocidad, sanidad, entre otras, eran mejores en algunas líneas restauradoras que las de la variedad testigo VA-110. En virtud de que la semilla de estas líneas experimentales puede obtenerse mediante autofecundación, se ha optado por registrar a tres de las líneas más destacadas con nomenclatura comercial: VA 610, VA 620 y VA 630, para facilitar la transferencia de tecnología. Los nombres de registro, así como el de la línea restauradora experimental y sus genealogías respectivas son los siguientes:

VA 610: CP R17: (Compuesto Dietil Sulfonato 4957) F1-1-1 Sel 17;

VA 620: CP R19: [(SOCB 37-4PL -1-1PL-1) grano blanco-24-26-2-2-2] Sel 19;

VA 630: CP R25: [(NY666-1 x H-I-MUT 1)-2-3-1] Sel 25.

Estas líneas han mostrado buena adaptación a los Valles Altos de México. En tres localidades del Estado de México (Santa Lucía, Tecámac y Montecillo) su rendimiento de semilla promedio por panoja fue de 38 g en riego y 8 g en seco (León-Velasco *et al.*, 2009a). En el año 2014, en Montecillo, el rendimiento promedio de las líneas osciló entre 32 y 38 g por panoja, en promedio de dos ambientes. El rasgo de tolerancia al frío (más de 90 % de grano en panojas autofecundadas) de estas líneas ha resultado estable en evaluaciones efectuadas en Celaya, Gto., Río Bravo, Tams. (Osuna-Ortega *et al.*, 2001) y en varias localidades y fechas de siembra en Montecillo, México (Osuna-Ortega *et al.*, 2000; Mendoza-Onofre *et al.*, 2006; León-Velasco *et al.*, 2009b). Estas líneas R producen más flores, más granos de polen, los granos de polen son de mayor tamaño y su periodo de floración es más largo, que el de las líneas B tolerantes al frío (Cisneros-López *et al.*, 2009).

La descripción fenotípica de las líneas restauradoras (Cuadro IV.1), con excepción del peso de semilla por panoja, se llevó a cabo con base en los descriptores de sorgo elaborados por la Unión de Productores y Obtentores de Variedades (UPOV) en Agua, Blanca, Municipio de Villa Juárez, Sonora (26° 58' N y 109° 43' O, altitud 20 m) en el ciclo O-I 2014; y en Montecillo, Edo de México (19° 29' N y 98° 54' O, altitud 2250 m) en el ciclo PV 2014, bajo condiciones de riego en ambas localidades. La variedad de polinización libre VA-110 se empleó como testigo en ambos casos. Con fecha 29 de julio del año en curso se ha iniciado el trámite ante SNICS para solicitar el título de obtentor y la inscripción en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales.

Cuadro IV. 1 Variables morfológicas de las líneas restauradoras. Datos promedio de dos ambientes.

NR	NE	EP [‡] (días)	AP [‡] (cm)	DT [‡] (mm)	LH [‡] (cm)	AH [‡] (cm)	LP [‡] (cm)	LE [‡] (cm)	PMS [‡] (g)	PSP ^{‡‡} (g)
VA 610	CP R17	79	152	18.0	61	6.4	23.5	5.5	36.2	31.68
VA 620	CP R19	81	125	17.6	61	6.7	26.2	6.1	33.2	32.1
VA 630	CP R25	82	132	15.0	48	6.0	22.8	5.5	27.7	37.3
VA-110		86	101	15.6	54	5.4	19.2	2.3	19.4	18.5

NR: Nombre del registro; NE: Nombre experimental; EP: Emergencia de la panoja; AP: Altura de planta; DT: Diámetro de tallo; LH: Largo de la 3ª hoja; AH: Ancho de la 3ª hoja; LP: Longitud de la panoja; LE: Longitud de excursión; PMS: Peso de mil semillas; PSP: Peso de semilla por panoja. [‡]Los dos ambientes fueron: Agua Blanca, Municipio de Villa Juárez, Sonora (ciclo OI-2014) y Montecillo, Edo. de México (ciclo PV-2014). ^{‡‡}Los dos ambientes fueron fechas de siembra en el ciclo PV-2014, en Montecillo, Edo de México.

El tipo de panoja y de grano de las líneas restauradoras contrasta con el de VA-110, en que no presentan pigmentación de antocianinas en las láminas foliares; son insensibles al fotoperiodo; el color del follaje es verde medio; la decoloración de la nervadura central de la hoja bandera es evidente (grande). En la madurez fisiológica VA 620 no presenta arista en la lema, las otras dos líneas son aristadas. El color de antera seca es marrón rojizo; las panojas son densas y compactas.

Los colores del grano y gluma son: marrón claro (VA 610); marrón oscuro y blanco amarillento (VA 620); marrón oscuro y amarillo claro (VA 630); forma del grano oval (VA 610 y VA 630) y globosa (VA 620); marca pequeña del germen, sin taninos; tipo y color del endospermo farináceo en $\frac{3}{4}$ amarillo; otras características morfológicas entre estas líneas se presentan en el Cuadro IV.1, y en la Figura IV.1 se ilustran algunos ejemplares representativos de las panojas.

El testigo VA-110 presenta pigmentación en el coleoptilo; hoja con halo grande descolorido en la nervadura central; estigma corto de color amarillo claro; densidad media de

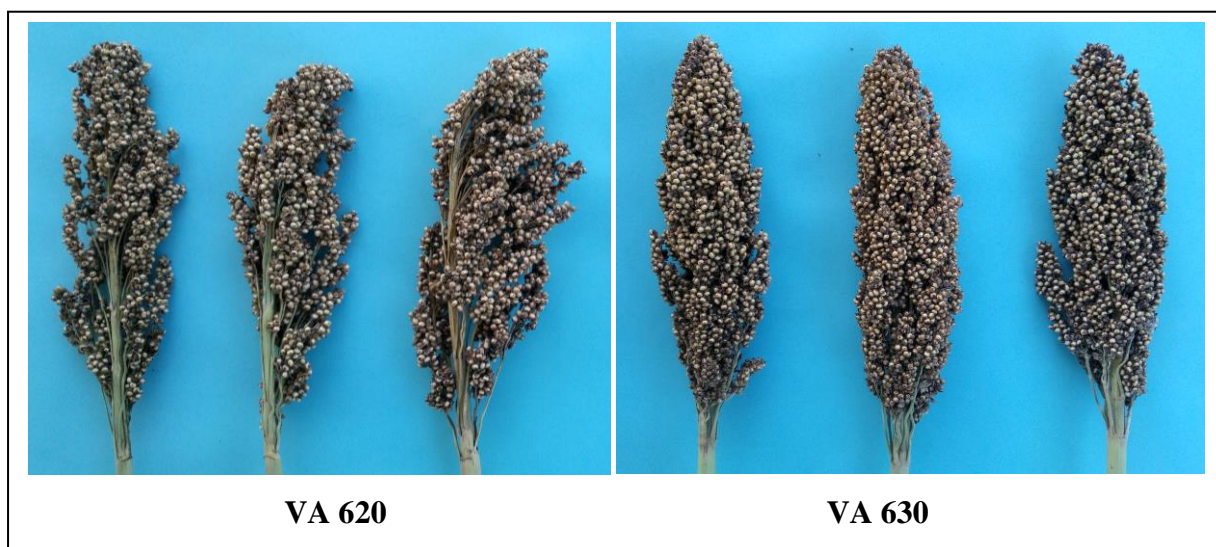


Figura IV.1 Panojas representativas de las líneas restauradoras de sorgo tolerantes al frío.

la panoja; en la madurez arista en la lema; gluma y color del grano marrón rojizo; forma elipsoide; marca del germen grande; con taninos y endospermo 100% farináceo.

Las líneas restauradoras presentan buena tolerancia al ergot (*Claviceps africana*) (Hernández-Martínez *et al.*, 2002; Mendoza-Onofre *et al.*, 2006) y al tizón de la panoja y pudrición del tallo [*Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg] (Cisneros-López *et al.*, 2007).

El cruzamiento entre las contrapartes androestériles (líneas A) adaptadas a las regiones sorgueras tradicionales (*i.e.*, Tamaulipas y El Bajío) con estas tres líneas restauradoras generan híbridos precoces de alto rendimiento de grano lo cual permite ampliar la adaptación y adaptabilidad de esta especie en México (Osuna-Ortega *et al.*, 2001).

La semilla original está disposición de los interesados en el Campus Montecillo del Colegio de Posgraduados. Se agradece el apoyo de los estudiantes becarios mexicanos del CONACYT, que han participado en este proyecto, así como del M. C. Julián Barrera Sánchez y su equipo de trabajo en Valle del Yaqui, Sonora y Tizimín, Yucatán, México por las facilidades brindadas para completar la descripción varietal.

BIBLIOGRAFÍA

- Cisneros-López M. E., L. E. Mendoza Onofre, H. A. Zavaleta-Mancera, V. A., González Hernández, L- Córdova-Téllez, M. Hernández-Martínez and G. Mora-Aguilera (2009).** Floral traits and seed production of sorghum A-, B- and R- lines under chilling field temperatures. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195: 464-471.
- Flores-Naveda, A., C. G. S. Valdés-Lozano, F. Zavala-García, E. Olivares-Sáenz, A. Gutiérrez-Díez y M. E. Vázquez Badillo (2013)** Comportamiento agronómico de líneas para la producción de semilla de sorgo. *Agronomía Mesoamericana* 24: 111-118.
- Hernández-Martínez, M., L. E. Mendoza-Onofre, P. Ramírez-Vallejo, S. Osada-Kawasoe, E. Cárdenas-Soriano and F. Zavala-García (2002).** Response of sorghum B and R lines to ergot (*Claviceps africana*) at Celaya, Guanajuato, México. In: Leslie, J. F. (ed.) Sorghum and Millets Diseases. Iowa State Press. Iowa, Manhattan, Kansas. USA. pp. 83-85.
- León-Velasco H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana y A. Martínez-Garza (2009a)** Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. I: Variabilidad genética y adaptabilidad *Agrociencia* 43: 483-496.
- León-Velasco H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana y A. Martínez-Garza (2009b)** Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. II: Aptitud combinatoria, heterosis y heterobeltiosis. *Agrociencia* 43: 609-623.
- Livera M., M. y A. Carballo C. (1985).** Ampliación de las áreas de adaptación del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). I: Análisis del potencial productivo de genotipos tolerantes al frío en los Valles Altos. *Fitotecnia* 7: 96-113.

- Mendoza-Onofre, L. E., M. Hernández-Martínez, E. Cárdenas-Soriano y P. Ramírez-Vallejo (2006).** El germoplasma de sorgo tolerante al frío como fuente potencial de tolerancia al ergot (*Claviceps africana* Frederickson, Mantle & de Milliano). *Agrociencia* 40: 593-603.
- Osuna-Ortega J., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, F. Castillo-González, Ma. del C. Mendoza-Castillo y H. Williams-Alanís (2000)** Potencial del germoplasma tolerante al frío en la adaptación y adaptabilidad del sorgo en México: I. Valles Altos. *Agrociencia* 34: 561-572.
- Osuna-Ortega J., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, F. Castillo-González, Ma. del C. Mendoza-Castillo y H. Williams-Alanís (2001)** Potencial del germoplasma tolerante al frío en la adaptación y adaptabilidad del sorgo en México: II. Río Bravo, Tamaulipas y Celaya, Guanajuato. *Agrociencia* 35: 625-636.
- Romo C., E. y A. Carballo C. (1980).** Características de tres variedades de sorgo para los Valles Altos. Circular CIAMEC 130. INIA-SARH. Chapingo, México. 11 p.

CONCLUSIONES GENERALES

En el experimento en condiciones de cama de arena, los híbridos simples y los híbridos trilineales presentan similares valores de heterosis media pero los primeros expresan mayor heterosis superior que los segundos. La línea androestéril A2 y la línea restauradora R14 destacan en sus valores de ACG dentro de los dos tipos de híbridos, por lo que son los mejores candidatos para emplearlos como progenitores de híbridos que destaquen por su crecimiento y desarrollo de plántulas.

En condiciones de campo los híbridos simples y trilineales demostraron similar desempeño genético y agronómico. Algunas líneas restauradoras mostraron rendimientos de grano estadísticamente similares ($p \leq 0.05$) a los mejores híbridos. La línea androestéril A1 y la línea restauradora R17 presentaron los mejores valores de ACG para rendimiento tanto en híbridos simples como en trilineales.

Se ha completado la descripción fenotípica de las primeras líneas mantenedoras (CP-TF B1, CP-TF B2, CP-TF B3 y CP-TF B5) y de líneas restauradoras (VA 610, VA 620 y VA 630) de sorgo granífero tolerantes al frío, adaptadas a los Valles Altos Centrales de México. Se dispone de los Certificados Provisionales de Inscripción en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas.