



EFFECTOS HETERÓTICOS EN LÍNEAS DOBLE HAPLOIDES DE MAÍZ DE GRANO BLANCO Y ALTO CONTENIDO DE ACEITE

HETEROTIC EFFECTS IN DOUBLED HAPLOID MAIZE INBRED LINES WITH WHITE GRAIN AND HIGH OIL CONTENT

Raymundo Picón-Rico, Ricardo E. Preciado-Ortiz^{1*},
Francisco Cervantes-Ortiz², Jorge Covarrubias-Prieto² y Arturo Terrón-Ibarra¹

¹Programa de Maíz, Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. km 6.5 Carr. Celaya-S.M. Allende. 38010, Celaya, Gto. ²Posgrado en Producción y Tecnología de Semillas, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Roque. km 8 Carr. Celaya-Juventino Rosas. 38110.

*Autor para correspondencia (preciado.ernesto@inifap.gob.mx), (preciado@yahoo.com)

RESUMEN

Para desarrollar híbridos de maíz (*Zea mays* L.) productivos con alto contenido de aceite (ACA), que impacten a corto plazo la industria pecuaria y alimenticia en México, se pueden estructurar esquemas de hibridación con líneas doble haploides (LDH). El objetivo del presente estudio fue determinar, mediante cruza directa y recíproca, los efectos genéticos presentes en rendimiento, características agronómicas y contenido de aceite en nueve LDH de grano blanco con ACA. Cinco LDH fueron derivadas de la Población Blanca del Noroeste (PBN) y cuatro de la Población Blanca del Bajío (PBB), que son heteróticamente contrastantes. Las cruza posibles se formaron en primavera-verano 2013 en Celaya, Gto. y se evaluaron en primavera-verano 2014 en Celaya Gto. y Tarímbaro, Mich. Se registraron datos de rendimiento de grano (RG), días a floración masculina (DFM), altura de planta (AP) y contenido de aceite (CA). Los resultados mostraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre localidades (L) y genotipos (G) en todas las variables. La interacción $G \times L$ fue altamente significativa ($P \leq 0.01$) para RG y DFM. Los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) fueron significativos ($P \leq 0.01$) para todas las características, en las que predominó ACG sobre ACE. Los efectos maternos (EM) mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para RG. Para ACG la línea LDH PBN DH 10 tuvo efectos altos para RG, DFM y AP, y la línea PBB DH 178 tuvo los mayores efectos para contenido de aceite en el grano (CA). En relación con ACE se observaron combinaciones con efectos altos y significativos en todas las variables. Se determinó el tipo de acción génica de las variables evaluadas y se observó que las LDH con mayor ACG participaron en cruza de alta ACE. Se observaron cruzamientos de alto contenido de aceite y RG superiores a 12.2 t ha^{-1} . Las LDH derivadas de PBB y PBN mantuvieron el patrón heterótico establecido entre ambas poblaciones.

Palabras clave: *Zea mays*, líneas doble haploides, alto contenido de aceite, efectos genéticos.

SUMMARY

Hybridization schemes based on doubled haploid lines (DHL) can be structured to develop productive high oil content (HOC) maize hybrids that impact the livestock and food industry in Mexico in the short term. The objective of this study was to determine, through direct and reciprocal crosses, genetic effects underlying grain yield, agronomic characteristics and oil content of nine HOC white kernel DHLs. Five DHL were derived from Northwest White Population (NWP) and four from Bajío White Population (BWP), which are heterotically opposite. The possible crosses were formed during the Spring-Summer 2013

in Celaya, Gto. and they were evaluated in Spring-Summer 2014 in Celaya, Gto. and Tarímbaro, Mich. Data on grain yield (GY), days to pollen shed (DPS), plant height (PH) and grain oil content (GOC) were recorded. Results showed highly significant differences ($P \leq 0.01$) between localities (L) and genotypes (G) for all traits. The $G \times L$ interaction was highly significant ($P \leq 0.01$) for GY and DPS. General and specific combining ability (GCA) and (SCA) effects were significant ($P \leq 0.01$) for all the traits, and GCA predominated over SCA. Maternal effects showed statistical differences ($P \leq 0.01$) for GY. For GCA effects, line PBN DH 10 presented large effects for GY, DPS and PH, and line PBB DH 178 presented the highest effects for GOC. In regard to SCA, combinations with high and significant effects were observed for all traits. The type of gene action of the evaluated traits was determined, and it was observed that DHLs with higher GCA participated in high SCA crosses. High oil content crosses were observed with grain yield above 12.2 t ha^{-1} . The DHL derived from NWP and BWP maintained the heterotic pattern already established between both populations.

Index words: *Zea mays*, doubled haploid lines, high oil content, genetic effects.

INTRODUCCIÓN

El uso de maíces (*Zea mays* L.) especializados con alto contenido de aceite es una estrategia que no se ha explotado en México, ya que de acuerdo con FAOSTAT (2013), de 22.7 millones de toneladas que se producen en el país, solamente 26,100 t son de alto contenido de aceite. Lo anterior debido a que no se han desarrollado híbridos adaptados a las regiones productoras de México y los híbridos introducidos de maíz presentan problemas de adaptación, por lo que no ha sido posible incrementar la producción para satisfacer la demanda potencial de maíz con mayores niveles de energía para las industrias pecuaria y de transformación. Por lo anterior, en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se está trabajando en la formación de híbridos de maíz con alto contenido de aceite para satisfacer la demanda del sector agropecuario e industrial. Un maíz con estas características tiene un gran valor para la nutrición humana y

pecuaria como fuente de energía, tanto para el ganado bovino como para animales monogástricos (Alexander, 1988; LaCount *et al.*, 1995; Lambert, 2001). Se considera con alto contenido de aceite aquel maíz que contiene más de 6 %, cuyo valor energético, por lo general, tiene un efecto significativo en las raciones de los animales, en comparación con el maíz normal, que contiene entre 2 y 5 % de aceite (Lambert, 2001).

Preciado y Terrón (1996) señalan que en un programa de mejoramiento genético la formación de poblaciones de alto potencial de rendimiento y buenas características agronómicas es básico para la generación de líneas puras superiores, que faciliten la producción de semilla de híbridos de buen potencial agronómico. Existen diferentes fuentes genéticas para la formación de poblaciones, tales como variedades de polinización libre, variedades sintéticas y compuestos formados por la recombinación de materiales nativos y mejorados. En su mejoramiento se usa selección recurrente cuyos métodos más usados son: selección masal, de medios hermanos y hermanos completos (Hallauer *et al.*, 2010). Además del tiempo utilizado en la integración y selección de poblaciones avanzadas, para derivar líneas endogámicas de dichas poblaciones se requiere por lo menos de 6 a 8 generaciones por el método convencional de autofecundaciones, y aun así, no se logra alcanzar 100 % de homocigosis (Zhang *et al.*, 2015).

Con la tecnología de inducción de haploidía *in vivo*, se obtienen líneas 100 % homocigotas en dos o tres generaciones, lo cual acorta el tiempo de forma considerable para la obtención de líneas endogámicas (Geiger y Gordillo, 2009). Los cuatro pasos básicos para el desarrollo de líneas doble haploides (LDH) son: 1) inducción a través de la cruce del germoplasma fuente con polen del inductor de haploidía; 2) identificación de haploides en la semilla cosechada, cruzada con el inductor, a través del marcador Navajo R₁-nj; 3) duplicación de los cromosomas con un inhibidor mitótico (colchicina), y 4) autofecundación de las plantas DH para incrementar la semilla de las nuevas líneas generadas (Prigge *et al.*, 2011).

El uso de diseños genéticos en el mejoramiento es una herramienta útil para identificar líneas progenitoras superiores en la generación de híbridos de maíz con alto potencial de rendimiento de grano y adecuadas características agronómicas (Antuna *et al.*, 2003). Las cruces dialélicas han sido ampliamente utilizadas en la selección de líneas con buena aptitud combinatoria general (ACG), que se identifica en aquellas líneas que manifiestan un buen desempeño a través de sus cruzamientos y con buena aptitud combinatoria específica (ACE), dando como resultado mejores combinaciones entre los progenitores utilizados. Los efectos de ACG están relacionados con el tipo de acción

génica aditiva y los efectos de ACE con los de dominancia y epistasias. Asimismo, las cruces dialélicas se emplean para estimar los componentes genéticos involucrados en las variables de estudio (Martínez, 1983).

El objetivo de la presente investigación fue determinar los efectos de aptitud combinatoria general y específica en rendimiento, características agronómicas y contenido de aceite en un grupo de líneas doble haploides de grano blanco derivadas de dos poblaciones subtropicales de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

La investigación se realizó en el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del INIFAP. El material genético utilizado en la formación de los cruzamientos dialélicos consistió en un grupo de líneas doble haploides (LDH) de grano blanco con alto contenido de aceite, derivado de las Poblaciones Blanca del Noroeste y Blanca del Bajío (PBN y PBB) que poseen germoplasma nativo, mejorado, básico y comercial adaptados a las regiones donde fueron formadas. Por su origen y composición genética, al cruzar estas poblaciones entre sí han manifestado una importante respuesta heterótica, por lo que se puede asumir que existe un patrón heterótico entre ellas. Estas poblaciones fueron sometidas a un proceso de selección recurrente para incrementar el contenido de aceite, y después de siete ciclos de selección, la PBB tuvo un contenido de aceite de 7.6 % y la PBN después de ocho ciclos de selección presentó un contenido de aceite de 6.7 % (Ortega-Corona *et al.*, 2015; Preciado-Ortiz *et al.*, 2013).

Generación de LDH y de sus combinaciones

La generación de LDH, a través de la cruce con el inductor de haploidía RWS × UH400, de origen alemán que es utilizado por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y su posterior duplicación se realizó durante 2011. En primavera-verano 2012 las LDH fueron establecidas en el CEBAJ para su incremento y selección. Se seleccionaron nueve LDH con base en su rendimiento y desempeño agronómico, las cuales se utilizaron para formar las cruces dialélicas (Cuadro 1). En el ciclo primavera-verano 2013 se formaron en el CEBAJ las cruces posibles directas y recíprocas.

Evaluación de las cruces y progenitores

La evaluación agronómica de las cruces posibles y sus líneas progenitoras se realizó bajo condiciones de riego en

Cuadro 1. Medias de las LDH de grano blanco con alto contenido de aceite para RG, CA y características agronómicas evaluadas durante primavera-verano 2014.

Orden	LDH	RG (t ha ⁻¹)	CA (%)	DFM (días)	AP (cm)
1	PBN [†] DH 16	3.96	6.4	84	153
2	PBN DH 4	1.89	6.7	81	138
3	PBN DH 10	2.74	7.2	85	196
4	PBN DH 2	1.58	6.3	85	175
5	PBN DH 5	2.69	6.3	82	191
6	PBB ^{**} DH 183	1.08	5.6	85	163
7	PBB DH 178	1.94	7.0	83	151
8	PBB DH 185	0.94	5.8	85	126
9	PBB DH 191	1.71	6.6	82	134

[†]PBN: Población Blanca del Noroeste; ^{**}PBB: Población Blanca del Bajío; LDH: Línea Doble Haploide; RG: rendimiento de grano; CA: contenido de aceite en el grano; DFM: días a floración masculina; AP: altura de planta.

el ciclo agrícola primavera-verano 2014 en las localidades de Celaya, Gto. (20° 58' 23" latitud N, 100° 81' 72" longitud O y altitud de 1750 msnm) y Tarímbaro, Mich. (19° 77' 36" latitud N, 101° 19' 23" longitud O, a 1860 msnm). La fecha de siembra en Celaya fue el 30 de junio y en Tarímbaro el 25 de junio de 2014.

Diseño y unidad experimental

Se usó un diseño experimental látice simple 9 × 9 parcialmente balanceado, con dos repeticiones. La unidad experimental fue de un surco de 5 m de largo con una separación de 0.76 m, en el caso de las parcelas donde fueron evaluados los progenitores, se establecieron tres surcos, para evitar efectos de sombreo de los híbridos a las líneas progenitoras colindantes; en estas parcelas sólo se cosechó el surco central. Se sembró con una separación entre semillas de 14.7 cm para obtener una densidad aproximada de 90,000 plantas ha⁻¹.

VARIABLES EVALUADAS

Se registraron los rasgos agronómicos número de días a floración masculina (DFM), considerados como los días transcurridos desde la siembra hasta al 50 % de floración; altura de planta (AP), medida en cm del suelo a la base de la espiga; rendimiento de grano (RG), calculado en t ha⁻¹ a partir del peso de campo ajustado al 14 % de humedad, y contenido de aceite en el grano (CA), éste se determinó en muestras obtenidas en el experimento conducido en el CEBAJ, donde se autofecundaron dos plantas en cada parcela experimental para evitar que en el contenido de aceite observado existiera un posible efecto de polinización cruzada (xenia). El análisis del contenido de aceite del grano se realizó en el Campo Experimental Norman Borlaug del INIFAP con un espectrofotómetro de rayos

infrarrojos cercanos (NIR) (Infratec™ 1241, Queensland, Australia) donde se analizaron los granos de cada mazorca autofecundada.

Análisis estadístico

Para cada variable se realizó un análisis de varianza para determinar ACG y ACE, los efectos recíprocos (ER) y efectos maternos (EM), de acuerdo con el Método I de Griffing (1956); para ello, se usó el programa de cómputo Diallel-SAS Method I (Zhang y Kang, 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

No obstante que se cuenta con información detallada de la respuesta de los materiales genéticos en cada localidad (L), sólo se muestran los resultados de análisis de varianza de las variables evaluadas a través de L. En el Cuadro 2 se aprecia que existieron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre L para todas las variables registradas; lo cual indica que las L mostraron diferencias en sus características climáticas, edáficas, etc. Entre genotipos (G), hubo diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en todas las características agronómicas, esto indica que al menos uno de los G fue diferente del resto, debido principalmente a la utilización de los progenitores y cruza en el mismo ensayo. En la interacción de G × L se identificaron efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$) en rendimiento de grano (RG) y días a floración masculina (DFM), lo que indica que los materiales genéticos mostraron diferentes respuestas a través de las condiciones ambientales entre las dos L muestreadas.

En la partición de cuadrados medios (CM) de G, se

Cuadro 2. Cuadrados medios, grados de libertad y significancia estadística del análisis dialélico a través de localidades para RG y características agronómicas en cruzas de LDH de maíz de grano blanco con alto contenido de aceite durante primavera-verano 2014.

Factor de variación	GL	RG	DFM	AP
Localidades (L)	1	6,753,935**	34.81**	105,300.25**
Genotipos (G)	80	32,431,260**	21.17**	2856.65**
L × G	80	6,788,894**	3.79**	301.9
ACG	8	30,294,451**	63.65**	3933.83**
ACE	36	61,446,746**	31.06**	5233.23**
ER	36	3,890,621	1.83	240.7
EM	8	6,766,075**	1.74	152.07
Error	160	28,079,660	2.09	245.94
Total	323			
C.V. (%)		21.03	1.82	7.15

** : Significancia estadística ($P \leq 0.01$); GL: grados de libertad; RG: rendimiento de grano; DFM: días a floración masculina; AP: altura de planta; ER: efectos recíprocos; EM: efectos maternos; CV: coeficiente de variación.

encontró que ACG y ACE presentaron efectos altamente significativos ($P \leq 0.01$) en todas las características evaluadas. La relación entre los CM de los efectos de ACG y ACE indica el tipo de acción génica predominante en las características estudiadas (Baker, 1978), en el caso de RG, el CM de ACE fue 100 % mayor que el de ACG lo que indica que en el RG los efectos genéticos de dominancia, o no aditivos, fueron más importantes que los aditivos, resultados que coinciden con los informados por De la Cruz *et al.* (2003), Escorcia-Gutiérrez *et al.* (2010), Sincik *et al.* (2011), Umar *et al.* (2014), pero difieren de los reportados por Ali *et al.* (2014), Andrio-Enríquez *et al.* (2015), Ofori *et al.* (2015), Pérez-López *et al.* (2014), Reyes *et al.* (2004); estas diferencias en la respuesta pueden atribuirse principalmente a la diversidad en los materiales genéticos utilizados por los diversos autores.

También los efectos de ACE fueron mayores que los de ACG en AP; resultados similares fueron reportados por De la Cruz *et al.* (2003), Umar *et al.* (2014); pero difieren de los obtenidos por Sincik *et al.* (2011). En DFM, los efectos de ACG fueron más importantes que los de ACE, resultados que coinciden con los informados por Antuna *et al.* (2003) y Cervantes-Ortiz *et al.* (2007) y que difieren de los reportados por Ávila *et al.* (2009), De la Cruz-Lázaro *et al.* (2005) y Umar *et al.* (2014).

Los efectos recíprocos no fueron significativos en ninguna variable; mientras que para RG hubo efectos maternos (EM) altamente significativos ($P \leq 0.01$), lo cual indica que tiene importancia el sentido en se formen las cruzas tanto para la producción de semilla como para su explotación comercial. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Revilla *et al.* (1999) y Cervantes *et al.* (2006), quienes

destacaron la importancia del progenitor femenino en la calidad de la semilla de maíz.

Para contenido de aceite en el grano (CA) se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre G (Cuadro 3), lo que indica que al menos un G presentó un comportamiento diferente a los demás. Los efectos de ACG y ACE en CA fueron significativos ($P \leq 0.01$), donde el CM de la ACG fue 140.7 % mayor que el de ACE, lo cual indica que en el CA los efectos genéticos aditivos son de mayor magnitud que los no aditivos. Hallauer *et al.* (2010) reportaron para CA una heredabilidad del 70 %; por lo tanto, para incrementar el contenido de aceite en maíz se recomienda hacer selección recurrente. Ortega-Corona *et al.* (2015) reportaron la respuesta a la selección para contenido de aceite en las poblaciones PBB y PBN involucradas en este estudio. Los efectos genéticos aditivos (ACG) fueron de relevancia, esto indica la importancia relativa de la acción sobre los efectos no aditivos, por lo que se recomienda seguir mejorando las poblaciones por selección recurrente en lugar de hibridación, de acuerdo con lo señalado por Pswarai y Vivek, (2008).

Una estrategia para incrementar el CA en maíz sería aprovechar primero la varianza genética aditiva mediante selección recurrente y después la formación de híbridos con progenitores de alto contenido de aceite. En este trabajo, después de haber incrementado el contenido de aceite a través de selección recurrente de las poblaciones involucradas en este estudio (Ortega-Corona *et al.*, 2015; Preciado-Ortiz *et al.*, 2013), y de haber derivado LDH de las mismas poblaciones, se plantea un esquema de hibridación que permita a corto plazo generar híbridos comerciales de alto contenido de aceite (ACA), adaptados

a regiones subtropicales de México, debido a la respuesta heterótica para rendimiento a través de los efectos no aditivos, que resulta complementaria a la respuesta aditiva del CA.

Efectos de aptitud combinatoria general

En el Cuadro 4 se observa que las LDH PBN DH 10, PBN DH 5 y PBN DH 16 fueron las que tuvieron mayor contribución al RG, ya que los valores de ACG fueron positivos y significativos ($P \leq 0.01$), del orden de 972.51, 647.54 y 552.26; con rendimientos de las líneas *per se* (que se pueden observar en el Cuadro 1) de 2.75, 2.70 y 3.96 t ha⁻¹, respectivamente; en contraste, los progenitores PBB DH 191, PBB DH 178 y PBB DH 183 tuvieron menor contribución, pues sus valores de ACG fueron negativos y significativos ($P \leq 0.01$) de -848.93, -609.17 y -533.32, con rendimientos

per se, de 1.7, 1.9, y 1.1 t ha⁻¹, respectivamente.

Estos efectos se deben principalmente a dos condiciones: 1) por la facilidad que tiene el progenitor de combinarse con otras líneas y 2) por el promedio del rendimiento de la línea y la media de sus cruzamientos; por esta razón no siempre el efecto positivo de la línea generará valores positivos y significativos de ACE.

Para CA el progenitor PBB DH 178 fue el único que tuvo efecto positivo y significativo ($P \leq 0.01$) de ACG, con 0.39 y un contenido de aceite de 7.0 %, mientras que las líneas PBN DH 5, PBN DH 2 y PBB DH 183 fueron consistentes con estimadores negativos. En DFM, las líneas PBN DH 10 y PBN DH 2 fueron de las más tardías (85 d), por lo que los efectos de ACG fueron positivos y significativos mientras que los efectos en las líneas PBB DH 191 y PBN DH 4 fueron negativos y correspondieron a los progenitores más precoces, pues la floración se registró a los 82 y 81 d, respectivamente. Con respecto a la altura de planta (AP) la LDH PBN DH 10 tuvo el efecto positivo significativo ($P \leq 0.01$) más alto, de 15.86 y AP de la línea *per se* de 196 cm, mientras que las líneas LDH: PBN DH 4 y PBN DH 191 presentaron efectos negativos altamente significativos de -6.27 y -11.48 con AP de las líneas *per se* de 138 y 134 cm, respectivamente. Los efectos de AP indican la relación que tienen las líneas de que al cruzarse aporten mayor o menor altura en los híbridos que intervienen.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis dialélico para CA en cruces de líneas DH de maíz de grano blanco con alto contenido de aceite.

Factor de Variación	GL	CA
Repeticiones	1	0.11
Genotipos	80	0.44**
ACG	8	1.30**
ACE	36	0.54**
ER	36	0.16
EM	8	0.13
Error	73	0.18
Total	154	
C.V. (%)		6.73

** : Significancia estadística ($P \leq 0.01$); GL: grados de libertad; CA: contenido de aceite en el grano; ER: efectos recíprocos; EM: efectos maternos.

Aptitud combinatoria específica

En el Cuadro 5 se presentan los efectos de ACE para RG, las cruces PBN DH 10 × PBB DH 178, PBN DH 5 × PBB DH 178 y PBN DH 10 × PBB DH 191 presentaron efectos positivos y significativos con valores de 3499, 3456 y 3301 y RG de 11.8, 12.5 y 10.3 t ha⁻¹, respectivamente, mientras

Cuadro 4. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para las variables RG, CA y características agronómicas en LDH de grano blanco con alto contenido de aceite durante primavera-verano 2014.

Genotipos	RG (kg ha ⁻¹)	CA (%)	DFM (días)	AP (cm)
PBN DH 16	552.26**	0.07	-0.11	0.19
PBN DH 4	340.03	-0.08	-0.33*	-6.27**
PBN DH 10	972.51**	0.02	1.44**	15.87**
PBN DH 2	-445.49**	-0.19**	0.41**	-1.16
PBN DH 5	647.54**	-0.23**	0.27	3.23
PBB DH 183	-533.32**	-0.19**	0.09	-1.37
PBB DH 178	-609.17**	0.39**	0.30	0.44
PBB DH 185	-75.42	0.11	0.07	0.57
PBB DH 191	-848.93**	0.08	-2.13**	-11.48**

** , * : Significancia estadística ($P \leq 0.01$) y ($P \leq 0.05$), respectivamente; RG: rendimiento de grano; CA: contenido de aceite en el grano; DFM: días a floración masculina; AP: altura de planta.

que PBB DH 183 × PBB DH 191, PBB DH 178 × PBB DH 185 y PBN DH 10 × PBN DH 2 presentaron estimadores negativos (-2843, -2282 y -2111 y bajos rendimientos, de 3.7, 4.4 y 6.5 t ha⁻¹, respectivamente). Es importante resaltar que en el caso de los efectos de ACE de las cruzas con estimadores altos y positivos, y con alto rendimiento, se trató de híbridos con líneas de origen contrastante (PBN × PBB o PBB × PBN); por el contrario, cruzas con líneas de la misma población mostraron efectos negativos de ACE y bajos rendimientos. Estos resultados coinciden con lo planteado por Hallauer *et al.* (2010), quienes afirmaron que cuando se utilizan líneas de diferente origen se presenta una mayor respuesta heterótica.

En las cruzas recíprocas PBB DH 185 × PBN DH 10 y PBB DH 183 × PBN DH 10 se observaron estimadores negativos (-1819.25, y -1140.37) pero con rendimientos altos (12.5 y 12.2 t ha⁻¹, respectivamente), debido principalmente a que se involucran líneas de ambas poblaciones del patrón heterótico utilizado. Es importante también resaltar que la línea PBN DH 10, que presentó alta ACG participa en una o varias cruzas con alta ACE, inclusive al combinar con líneas derivadas de la misma población, tal es el caso de las cruzas PBN DH 10 × PBN DH 16 y PBN DH 4 × PBN DH 10, las cuales presentan rendimientos de grano aceptables (10.6 y 10.5 t ha⁻¹, respectivamente).

Con el fin de explicar que los EM para RG mostraron valores significativos, se puede observar la respuesta de los progenitores masculino y femenino utilizados en los cruzamientos. Los efectos fueron mayores al combinar LDH derivadas de PBN × PBB; sin embargo, en cruzas recíprocas entre LDH de PBB × PBN los efectos en la mayoría de los casos fueron menos importantes; a manera de ejemplo, en la parte inferior del Cuadro 5 se puede observar que la cruce PBB DH 191 × PBN DH 10 fue la más rendidora, con un promedio en las dos localidades de 12.52 t ha⁻¹ y su cruce recíproca, aunque presentó efectos positivos y significativos, tuvo un rendimiento fue de 10.3 t ha⁻¹. Con respecto a los rendimientos *per se* de estas líneas (Cuadro 1), aunque la línea PBB DH 191 rinde 1.7 t ha⁻¹ y la PBN DH 10 rinde 2.7 t ha⁻¹, no habría duda de cuál línea conviene utilizar como progenitor femenino.

En este sentido, Sámano *et al.* (2009) comentan que el efecto materno se refiere al efecto del genotipo o tejido materno sobre alguna característica de su progenie y para esta variable se presenta principalmente a la productividad de la línea. Los estudios de diferencias entre cruzas directas y recíprocas para características de importancia económica pueden ayudar a los mejoradores a tomar decisiones en las estrategias a seguir en un programa de mejoramiento (Hallauer *et al.*, 1988). Las diferencias entre cruzas recíprocas en algunos caracteres agronómicos han

sido reportadas en varios estudios en maíz (Ordás *et al.*, 2008; Revilla *et al.*, 1999).

En los efectos de ACE para CA (Cuadro 6) sobresalen las cruzas PBN DH 4 × PBB DH 178, PBB DH 178 × PBB DH 185 y PBN DH 5 × PBB DH 191 con estimadores altos y positivos, y las cruzas PBB DH 183 × PBB DH 178, PBB DH 185 × PBB DH 178 y PBN DH 2 × PBB DH 191 expresaron estimadores negativos. Es importante indicar que la línea PBB DH 178 presentó un valor alto y positivo de ACG e intervino en la mayoría de las cruzas de alta ACE para esta característica. En general, las líneas con valores negativos de ACG para CA y RG no mostraron una asociación directa entre RG y CA a través de sus cruzas, ya que los cruzamientos específicos PBB DH 183 × PBN DH 2, PBN DH 5 × PBN DH 4 y PBN DH 16 × PBB DH 178 presentaron altos CA (7.8, 7.65 y 7.05, respectivamente) y no mostraron efectos significativos de ACG y ACE, ni tampoco RG sobresalientes. No obstante lo anterior, se pudo observar algunas cruzas de alto CA (arriba de 6.0 %) con RG promedio superiores a las 12.2 t ha⁻¹.

Para DFM, sobresalieron las cruzas PBN DH 16 × PBB DH 183, PBN DH 10 × PBB DH 191 y PBN DH 2 × PBB DH 191 con valores negativos y significativos, lo que indica que mostraron mayor precocidad, mientras que las cruzas PBB DH 183 × PBB DH 191 y PBN DH 10 × PBN DH 2 fueron las más tardías (Cuadro 7). Es importante mencionar que en las cruzas con valores positivos y significativos intervinieron líneas derivadas de la misma población, lo que indica que las cruzas resultantes de líneas de las poblaciones PBB × PBB tienden hacia mayor precocidad y las de PBN × PBN a ser más tardías; en el caso de los valores negativos y significativos las líneas que intervinieron en las cruzas provienen de poblaciones contrastantes, lo que muestra que al cruzar líneas derivadas de diferente población los materiales resultaron más precoces. Lo anterior puede interpretarse como una manifestación de heterosis hacia precocidad.

En AP sobresalieron las cruzas PBN DH 16 × PBB DH 185, PBN DH 16 × PBB DH 191 y PBN DH 10 × PBB DH 178, con valores altos y positivos; caso contrario ocurrió con las cruzas PBN DH 16 × PBN DH 5, PBN DH 10 × PBN DH 5 y PBB DH 185 × PBN DH 2, que presentaron efectos negativos y menor porte de planta (Cuadro 8). Estos resultados destacan que al cruzar líneas de la población PBN × PBB se obtuvieron genotipos con mayor porte, lo que también podría interpretarse como una manifestación de heterosis.

Los efectos genéticos en los diversos rasgos agronómicos constituyen una herramienta de gran importancia para el trabajo del fitomejorador en la detección de cruzamientos específicos sobresalientes, que aunado al buen

Cuadro 5. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para RG (parte superior del cuadro) y medias de las cruzas directas y recíprocas (parte inferior) del dialélico de LDH de grano blanco con alto contenido de aceite derivadas de PBB y PBN, evaluadas durante primavera-verano 2014.

Genotipos	PBN DH 16	PBN DH 4	PBN DH 10	PBN DH 2	PBN DH 5	PBB DH 183	PBB DH 178	PBB DH 185	PBB DH 191
PBN DH 16		674.1	-402.011	294.48	-232.41	1298.32**	182.17	2591.67**	706.30
PBN DH 4	932		153.35	1063.75*	-1056.55*	1018.93*	1483.53**	1948.28**	1467.04**
PBN DH 10	-1467.62**	1066.75		-2110.86**	-1713.91**	2652.82**	3498.79**	1788.04**	3301.18**
PBN DH 2	235.875	-875.12	123.5		-143.44	2329.57**	786.54	1739.29***	1539.80**
PBN DH 5	-777.75	157.62	64.25	-367.5		2825.29**	3456.14**	1639.76**	1792.53**
PBB DH 183	-892.625	-376.25	-1140.37*	-208.875	-99.125		-837.62	-627.49	-2842.60**
PBB DH 178	-64.625	297.25	-26	-434.5	997.375	458.5		-2281.52**	-1481.26**
PBB DH 185	155.625	-1040	-1819.25**	126.5	545.75	-703.875	-624.75		75.239
PBB DH 191	-274.75	-723.25	-1132.12*	-512	-229.5	-66	-323.25	208.25	
Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)									
PBN DH 16		10.47	7.62	8.60	8.16	8.40	8.03	11.20	8.10
PBN DH 4	8.60		10.50	8.10	8.10	8.42	9.50	9.14	8.20
PBN DH 10	10.56	8.37		6.51	7.94	9.92	11.80	8.83	10.26
PBN DH 2	8.13	9.80	6.26		7.66	9.11	7.27	9.31	9.31
PBN DH 5	9.71	7.74	7.81	8.39		10.81	12.46	10.73	9.33
PBB DH 183	10.18	9.17	12.20	9.53	11.01		6.45	6.03	3.68
PBB DH 178	8.16	8.88	11.86	8.13	10.46	5.53		4.38	4.71
PBB DH 185	10.88	11.22	12.47	9.06	9.63	7.44	5.63		7.33
PBB DH 191	8.65	9.65	12.52	8.73	9.79	3.81	5.35	6.91	

** , * : Significancia estadística (P ≤ 0.01) y (P ≤ 0.05), respectivamente.

desempeño de sus progenitores, hagan posible generar híbridos agrónomicamente superiores y alto potencial de rendimiento. Al analizar los resultados sobre RG, CA y características agrónomicas se observaron progenitores que mostraron alta ACG y que intervinieron en cruzas específicas sobresalientes, lo cual concuerda con lo reportado por Ávila *et al.* (2009), Cervantes *et al.* (2006), Cervantes-Ortiz *et al.* (2007) y Haro *et al.* (2007), quienes señalaron que una craza específica será destacada si al menos uno de sus progenitores es de alta ACG. Por otro lado, se observó falta de consistencia en el comportamiento de la mejor ACE con respecto a los estimadores de los progenitores con la mayor ACG; en este sentido, De la Cruz-Lázaro *et al.* (2010) puntualizaron que el comportamiento de las cruzas específicas no puede ser predicho totalmente con base en los estimadores de la ACG de sus parentales.

CONCLUSIONES

Los resultados reflejaron que los efectos aditivos y de dominancia están presentes para todas las variables estudiadas; en rendimiento de grano y altura de planta los efectos de dominancia fueron más importantes; para contenido de aceite en el grano y días a floración masculina los efectos aditivos fueron de mayor relevancia. El patrón

heterótico establecido entre las poblaciones Blanca del Bajío y Blanca del Noroeste mantuvo su respuesta a través de las combinaciones híbridas que involucran LDH de ambas poblaciones. Entre los cruzamientos se observaron manifestaciones de heterosis para precocidad, altura de planta y mazorca. Existió consistencia entre los progenitores con la mayor aptitud combinatoria general en la formación de cruzas de alta aptitud combinatoria específica. Se encontró la presencia de efectos maternos para rendimiento de grano, lo que permite decidir sobre la LDH a utilizar como progenitor masculino o femenino en la producción de semilla.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo que apoyó en la derivación de las líneas doble haploides de maíz utilizadas en este estudio, a través de la craza del inductor de haploidía con las poblaciones PBN y PBB, la identificación de semillas haploides y su posterior duplicación (en especial se agradece al Dr. George Mahuku y al Ing. Leocadio Martínez). Se agradece al MC. Manuel de Jesús Guerrero Herrera del Campo Experimental Norman Borlaug del INIFAP por su apoyo en el análisis del contenido de aceite de las muestras estudiadas. Así mismo, se

Cuadro 6. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para CA (parte superior del cuadro) y medias para CA de cruzas directas y recíprocas (parte inferior) del dialélico de LDH de grano blanco con alto contenido de aceite derivadas de PBB y PBN evaluadas durante primavera-verano 2014.

Genotipos	PBN DH 16	PBN DH 4	PBN DH 10	PBN DH 2	PBN DH 5	PBB DH 183	PBB DH 178	PBB DH 185	PBB DH 191
PBN DH 16		-0.16	-0.33	0	0.17	-0.13	0.12	0.17	0.18
PBN DH 4	-0.18		0.07	0.15	0.09	0.22	0.80**	-0.2	0.28
PBN DH 10	0.4	-0.15		0.23	0.07	-0.03	0.12	0.05	0.05
PBN DH 2	-0.18	0.33	-0.1		-0.17	0.31	0.23	0.03	-0.46**
PBN DH 5	0.3	-0.18	0.2	-0.25		0.07	0.25	-0.15	0.50**
PBB DH 183	0.05	0.15	-0.1	0.13	0.05		-0.72**	0.23	0.36*
PBB DH 178	0.18	-0.25	0.08	0.23	0.15	0.38		0.53**	0.04
PBB DH 185	-0.05	0.08	0.13	0.05	-0.08	-0.35	-0.48**		-0.04
PBB DH 191	0.08	-0.28	-0.2	0.03	-0.05	-0.25	0.15	-0.05	
Contenido de aceite (%)									
PBN DH 16		5.95	6.45	6.00	6.60	6.10	7.05	6.60	6.00
PBN DH 4	6.00		6.30	4.90	6.15	6.50	5.90	6.40	6.25
PBN DH 10	6.10	6.30		6.20	6.30	5.65	6.45	6.10	5.95
PBN DH 2	6.20	6.70	5.70		6.35	6.00	6.90	6.60	5.95
PBN DH 5	6.10	7.65	6.85	6.20		6.35	5.85	6.45	5.00
PBB DH 183	5.90	6.75	6.95	6.10	6.40		5.45	6.35	6.00
PBB DH 178	5.60	6.50	6.70	6.80	6.55	5.70		6.30	6.85
PBB DH 185	6.15	6.55	6.05	7.80	6.85	6.70	6.65		5.95
PBB DH 191	6.10	5.40	6.35	5.90	6.65	6.80	6.50	5.55	

** , * : Significancia estadística ($P \leq 0.01$) y ($P \leq 0.05$), respectivamente.

Cuadro 7. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para la variable DFM en cruzas de LDH de maíz de grano blanco con alto contenido de aceite durante primavera-verano 2014.

Genotipos	PBN DH 16	PBN DH 4	PBN DH 10	PBN DH 2	PBN DH 5	PBB DH 183	PBB DH 178	PBB DH 185	PBB DH 191
PBN DH 16		-0.66	0.08	-0.64	0.50	-2.45**	-0.53	0.07	-1.48**
PBN DH 4	-0.5		-0.07	0.58	0.34	-0.35	-0.94*	-1.71**	0.75
PBN DH 10	0.25	-0.38		1.19**	0.70	-1.24**	-0.20	-1.23**	-2.27**
PBN DH 2	0.25	0.5	0.38		0.86*	-2.09**	-0.67	-1.70**	-2.12**
PBN DH 5	-0.25	0.38	0.75	-0.63		-0.70	-0.78	-1.06*	-1.98**
PBB DH 183	-0.88	1.00*	0.13	0	-0.75		-0.23	0.50	1.33**
PBB DH 178	-0.25	0.13	-0.13	0.63	-0.13	-0.25		0.16	-0.38
PBB DH 185	0.13	-0.38	0.63	-0.13	-0.13	-0.25	0.13		-0.78
PBB DH 191	0.13	-0.63	0.88	-0.5	0.25	0.38	-0.13	-1	

** , * : Significancia estadística ($P \leq 0.01$) y ($P \leq 0.05$), respectivamente.

Cuadro 8. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para la variable AP en cruzas de LDH de maíz de grano blanco con alto contenido de aceite evaluadas durante primavera-verano 2014.

Genotipos	PBN DH 16	PBN DH 4	PBN DH 10	PBN DH 2	PBN DH 5	PBB DH 183	PBB DH 178	PBB DH 185	PBB DH 191
PBN DH 16		0.05	6.54	4.82	-16.45**	6.90	11.97**	27.45**	25.88**
PBN DH 4	-5.75		4.25	9.40	-4.87	13.36**	19.05**	14.54**	13.47**
PBN DH 10	-3.13	-0.63		-1.49	-12.76**	11.84**	20.66**	14.90**	10.83*
PBN DH 2	1.88	1.25	-3.75		0.52	5.75	8.32	13.80**	0.86
PBN DH 5	-8.75	5.13	14.38**	-1.88		20.11**	11.43*	18.79**	17.72**
PBB DH 183	0	1.25	4.38	-1.25	2.5		2.27	2.13	-8.31
PBB DH 178	-3.13	0	2.5	-0.63	-0.63	-6.88		-2.17	-2.62
PBB DH 185	15.00**	-1.88	-4.38	-12.50*	-0.63	-0.63	-1.88		4.75
PBB DH 191	-3.63	-6.25	-7	0	3.75	-1.88	-9.38	-0.63	

** , * : Significancia estadística (P ≤ 0.01) y (P ≤ 0.05), respectivamente.

agradece las aportaciones en la revisión de este manuscrito al Dr. Miguel Ángel Ávila Perches.

BIBLIOGRAFÍA

Alexander D. E. (1988) Breeding special nutritional and industrial types. In: Corn and Corn Improvement. G. F. Sprague and J. W. Dudley (eds.). 3rd. edition. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp:869-880.

Ali G., Z. A. Dar, I. Ahmad, A. A. Lone, S. A. Dar, M. Habib, A. B. Shikari and S. A. Nagoo (2014) Combining ability studies over environments in high altitude elite inbred lines of maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Agriculture Innovations and Research* 2:1108-1113.

Andrío-Enríquez E., F. Cervantes-Ortiz, J. G. Rivera-Reyes, L. P. Guevara-Acevedo, S. A. Rodríguez-Herrera, G. Rodríguez-Perez, J. R. Rangel-Lucio y M. Mendoza-Elos (2015) Aptitud combinatoria y efectos maternos en razas de maíz mexicanas por el modelo I de Griffing. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Science, ex Agrociencia* 31:5-14.

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

Ávila P. M. A., S. A. Rodríguez H., M. E. Vázquez B., F. Borrego E., A. J. Lozano R. y A. López B. (2009) Aptitud combinatoria y efectos recíprocos en líneas endogámicas de maíz de valles altos del centro de México. *Agricultura Técnica en México* 35:285-293.

Baker R. J. (1978) Issues in diallel analysis. *Crop Science* 18:533-536, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183x001800040001x>.

Cervantes O. F., G. García S., A. Carballo-Carballo, D. Bergvinson, J. L. Crossa, M. Mendoza-Elos y E. Moreno-Martínez (2006) Análisis dialélico para caracteres de vigor de semilla y de plántula en genotipos de maíz tropical. *Agricultura Técnica en México* 32:77-87.

Cervantes-Ortiz F., G. García-De los Santos, A. Carballo-Carballo, D. Bergvinson, J. L. Crossa, M. Mendoza-Elos y E. Moreno-Martínez (2007) Herencia del vigor de plántula y su relación con caracteres de planta adulta en líneas endogámicas de maíz tropical. *Agrociencia* 41:425-433.

De la Cruz L. E., E. Gutiérrez R., A. Palomo G. y S. Rodríguez H. (2003) Aptitud combinatoria y heterosis de líneas de maíz en la Comarca Lagunera. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:279-284.

De la Cruz-Lázaro E., S. A. Rodríguez-Herrera, M. A. Estrada-Botello, J. D. Mendoza-Palacios y N. P. Brito-Manzano (2005) Análisis dialélico de líneas de maíz QPM para características forrajeras. *Univer-*

sidad y Ciencia 21:19-26.

De la Cruz-Lázaro E., G. Castañón-Nájera, N. P. Brito-Manzano, A. Gómez-Vázquez, V. Robledo-Torres y A. J. Lozano-del Río (2010) Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Phyton* 79:11-17.

Escorcía-Gutiérrez N., J. D. Molina-Galán, F. Castillo-González y J. A. Mejía-Contreras (2010) Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruzas simples de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:271-279.

FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations-Statistics Division (2013) Base de Datos de Estadísticas Agrícolas. Food and Agriculture Organization of the United Nations-Statistics Division. Rome. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (Abril 2018).

Geiger H. H. and G. A. Gordillo (2009) Doubled haploids in hybrid maize breeding. *Maydica* 54:485-499.

Griffing B. (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences* 9:463-493, <http://dx.doi.org/10.1071/bi9560463>.

Hallauer A. R., W. A. Russell and K. R. Lamkey (1988) Corn breeding. In: Corn and Corn Improvement. 3rd edition. G. F. Sprague and J. W. Dudley (eds.). American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp:463-564, <http://dx.doi.org/10.2134/agronmonogr18.3ed.c8>.

Hallauer A. R., M. J. Carena and J. B. Miranda Filho (2010) Quantitative Genetics in Maize Breeding. 3rd. Springer. New York. 663 p, <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0>.

Haro R. P. A., M. C. J. García y H. Reyes-Valdés (2007) Determinación materna del contenido de aceite en semillas de girasol. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:39-42.

LaCount D. W., J. K. Drackley, T. M. Cicela and J. H. Clark (1995) High oil corns as silage or grain for dairy cows during an entire lactation. *Journal of Dairy Science* 78:1745-1754, [http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(95\)76800-x](http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(95)76800-x).

Lambert R. J. (2001) High-oil corn hybrids. In: Specialty Corns. 2nd edition. A. R. Hallauer (ed.). CRC Press. Boca Ratón, Florida, USA. pp:131-154, <http://dx.doi.org/10.1201/9781420038569.ch5>.

Martínez G. A. (1983) Diseños y Análisis de Experimentos de Cruzas Dialélicas. 2da. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. 252 p.

Ofori A. P., K. Ofori, K. Obeng-Antwi, K. M. L. Tengan and B. Badu-Apraku (2015) Combining ability and heterosis estimate of extra-early quality protein maize (QPM) single cross hybrids. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 7:87-93, <http://dx.doi.org/10.5897/JPBCS2015.0496>.

Ordás B., R. A. Malvar, A. Ordás and P. Revilla (2008) Reciprocal differences in sugary × sugary enhancer sweet corn hybrids. *Journal of the*

- American Society for Horticultural Science* 133:777-782.
- Ortega-Corona A., R. Picón-Rico, R. E. Preciado-Ortiz, A. D. Terrón-Ibarra, M. J. Guerrero-Herrera, S. García-Lara and S. O. Serna-Saldivar (2015) Selection response for oil content and agronomic performance in four subtropical maize populations. *Maydica* 60:1-8.
- Pérez-López F. J., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, J. D. Molina-Galán, J. J. López-Reynoso y T. Cervantes-Santana (2014) Líneas homocigóticas de maíz de alto rendimiento como progenitoras de híbridos de cruz simple. *Agrociencia* 48:425-437.
- Preciado-Ortiz R. E., S. García-Lara, S. Ortiz-Islas, A. Ortega-Corona and S. O. Serna-Saldivar (2013) Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crops Research* 142:27-35, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.019>.
- Preciado O. R. y A. D. Terrón I. (1996) Efectos heteróticos entre y dentro de fuentes de germoplasma de maíz a través de cruza simples emparentadas. *Agricultura Técnica en México* 22:219-230.
- Prigge V., C. Sánchez, B. S. Dhillon, W. Schipprack, J. L. Araus, M. Bänziger and A. E. Melchinger (2011) Doubled haploids in tropical maize: I. Effects of inducers and source germplasm on *in vivo* haploid induction rates. *Crop Science* 51:1498-1506, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2010.10.0568>.
- Pswarayi A. and B. S. Vivek (2008) Combining ability amongst CIMMYT's early maturing maize (*Zea mays* L.) germplasm under stress and non-stress conditions and identification of testers. *Euphytica* 162:353-362, <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-007-9525-0>.
- Revilla P., A. Butrón, R. A. Malvar and R. A. Ordás (1999) Relationship among kernel weight, early vigor, and growth in maize. *Crop Science* 39:654-658, <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183x003900020007x>.
- Reyes L. D., J. D. Molina G., M. A. Oropeza R. y E. C. Moreno P. (2004) Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza Tuxpeño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:49-56.
- Sámano G. D., F. Rincón S., N. A. Ruiz T., J. Espinoza V. y H. De León C. (2009) Efectos genéticos en cruza directa y recíprocas formadas a partir de líneas de dos grupos germoplásmicos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:67-74.
- Sincik M., A. T. Goksoy and Z. M. Turan (2011) The heterosis and combining ability of diallel crosses of rapeseed inbred lines. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39:242-248, <http://dx.doi.org/10.15835/nbha3926375>.
- Umar U. U., S. G. Ado, D. A. Aba and S. M. Bugaje (2014) Combining ability, gene action and heterosis in maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *International Journal of Agriculture Innovations and Research* 3:953-958.
- Zhang Y. and M. S. Kang (2003) Diallel-SAS: a program for Griffing's diallel methods. In: Handbook of Formulas and Software for Plant Geneticists and Breeders. Food Products Press-Haworth Press. New York, USA. pp:1-19.
- Zhang Z., H. Pu, P. Liu, W. Deng, S. Yu, G. Chen and F. Jiang (2015) Advances in doubling methods of haploids by *in vivo* induction in maize. *Agricultural Biotechnology* 4:20-22.