

Aptitud combinatoria de variedades y heterosis de cruza intervarietales divergentes de maíz de grano amarillo

Combining ability of varieties and heterosis of divergent intervarietal crosses of yellow grain maize

Roberto de la Cruz Díaz-Juárez¹ ,
Fernando Castillo-González^{1*} ,
Amalio Santacruz-Varela² ,
Noel Orlando Gómez-Montiel³ ,
J. Jesús García-Zavala² ,
Abel Muñoz-Orozco^{2†}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional Pacífico Sur (CIRPAS). Campo Experimental Zacatepec, Carretera Zacatepec-Galeana km. 0.5, CP. 62780. Colonia Centro, Zacatepec de Hidalgo, Morelos, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética. Carretera México-Texcoco km 36.5, CP. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

³INIFAP-CIRPAS. Campo Experimental Iguala, Carretera Iguala - Tuxpan Km. 2.5. CP. 40000. Tuxpan, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

* Autor de correspondencia:
fcastill@colpos.mx

Artículo científico

Recibido: 16 de mayo 2023

Aceptado: 13 de septiembre 2023

Como citar: Díaz-Juárez R de la C, Castillo-González F, Santacruz-Varela A, Gómez-Montiel NO, García-Zavala JJ, Muñoz-Orozco A (2023) Aptitud combinatoria de variedades y heterosis de cruza intervarietales divergentes de maíz de grano amarillo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(3): e3790. DOI: 10.19136/era.a10n3.3790

RESUMEN. La estimación de los parámetros genéticos permite determinar las metodologías del mejoramiento genético a utilizar para el mejor aprovechamiento del germoplasma. Se evaluaron agrónomicamente 32 poblaciones de maíz de grano amarillo de origen diverso, posteriormente se seleccionaron las ocho con mejor comportamiento y diversidad contrastante, las cuales se usaron para obtener 56 cruza (Método 1 de Griffing), que se evaluaron en dos localidades, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar. El objetivo fue estimar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), el tipo de acción génica, y determinar la presencia de efectos maternos (EMat) y recíprocos (ERec) en caracteres agrónomicos; así como, estimar la heterosis del rendimiento de grano (REN) en las cruza. Se cuantificó REN y seis caracteres agrónomicos. Se encontraron diferencias significativas entre genotipos, ACG y ACE para todos los caracteres; así mismo, entre ambientes para altura de planta (AP), coeficiente de desgrane, longitud del grano (LG) y REN. En cuanto a los EMat y las interacciones Genotipos \times Ambientes, ACG \times Ambientes diferencias para AP, LG, peso de 100 granos, días a floración femenina, índice de prolificidad y REN. Los efectos aditivos predominan en la expresión de los caracteres evaluados. Por otro lado, existe significancia para EMat, pero no para ERec en la expresión de los caracteres. Además, hubo heterosis positiva en el rendimiento de las cruza. La aptitud combinatoria y heterosis servirá para seleccionar las mejores variedades e incluirlas en un programa de mejoramiento genético para la zona de Valles Altos de México.

Palabras clave: Aptitud combinatoria específica, aptitud combinatoria general, efectos maternos, heterosis, *Zea mays* L.

ABSTRACT. The estimation of genetic parameters provide makes it possible to decide the plant breeding methodologies to be applied in order to have better utilization of the germplasm. 32 yellow grain maize population from different origins were field evaluated, were subsequently selected eight with the better agronomic performance and wide genetic diversity, which were used to obtain 56 crosses (Griffing's Method 1), these crosses were evaluated in two locations under a randomized complete block experimental design. The objective was to estimate the general (GCA) and specific combining ability (SCA), the predominant type of gene action, and to determine the presence of maternal (MatE) and reciprocal effects (RecE) for agronomics traits, as well as, to estimate heterosis for grain yield (GY) in yellow grain maize crosses. GY and six agronomic traits were quantified. Significant differences were found between genotypes, GCA and SCA for all traits. In addition, between environmental for plant height (PH), shelling coefficient, kernel length (KL), and GY. As well as for MatE and for Genotypes \times Environmental, GCA \times Environmental interactions for PH, KL, 100-kernels weight, female flowering days, prolificacy index and GY. Additive effects were predominant for traits evaluated. Otherwise, there is significance to MatE but not for RecE in the expression of the traits. Furthermore, there was positive heterosis in crosses yield. Combining ability and heterosis will serve to select the best varieties and include them in a breeding program for the Highlands Region of Mexico.

Key words: Specific combining ability, general combining ability, maternal effects, heterosis, *Zea mays* L.

INTRODUCCIÓN

En México se cultivan principalmente dos tipos de maíz para grano, maíz blanco para consumo humano y maíz amarillo para el sector pecuario e industrial. En el caso del maíz de grano amarillo no se satisface la demanda nacional, en el periodo de octubre 2022 a septiembre 2023 se espera importar el 74.5% (SIAP 2023), por lo que es necesario desarrollar variedades mejoradas con mayor potencial de rendimiento para aumentar la producción. El desarrollo de variedades se puede realizar mediante selección, hibridación o la combinación de ambas técnicas. Sin embargo, la elección de la técnica depende de los objetivos del programa y de las características intrínsecas del germoplasma a utilizar (Hallauer *et al.* 2010). Para la estimación de parámetros genéticos que auxilian al genetista en la elección de la técnica de mejoramiento requiere la evaluación de un esquema de cruzamientos, que permita estimar la aptitud combinatoria de los genotipos, la heredabilidad de los caracteres y la heterosis (Gardner y Eberhart 1966).

La aptitud combinatoria (AC) determina el potencial de los progenitores para el desarrollo de variedades con mayor rendimiento (Abera *et al.* 2016). Para estimar la AC se puede aplicar los diseños de cruas dialélicas, propuestos por Griffing (1956), que evalúa un conjunto de progenitores y sus cruzamientos posibles. Otro parámetro importante para la obtención de híbridos es la heterosis, donde la divergencia genética entre los progenitores juega un papel importante como predictor del rendimiento (Abera *et al.* 2016). En México existen muchos estudios sobre aptitud combinatoria y heterosis en maíz de grano blanco, pero pocos en maíz de grano amarillo. En cuanto a maíz amarillo, Martínez-Yañez *et al.* (2017) valoraron el potencial de rendimiento de híbridos no convencionales y la heterosis; mientras que Aly (2013) evaluó la AC; otros han estudiado el comportamiento agronómico de poblaciones (Hernández-Vázquez *et al.* 2018) y el potencial de rendimiento en cruas intervarietales divergentes (Díaz-Juárez *et al.* 2022).

Los estudios mencionados en maíz de grano amarillo presentan la limitante de considerar progenitores originarios de la misma región de los Valles Altos de México, a pesar de la diversidad de maíz de grano amarillo en otras regiones, y en ninguno se mencionan los efectos maternos (EMat) y recíprocos (ERec), debido a que no se consideran importantes (Hallauer *et al.* 2010). Por lo tanto, el conocimiento sobre AC y heterosis en maíz de grano amarillo, así como la presencia de efectos maternos y recíprocos es limitado, lo que hace necesario estudiar genotipos de maíz de grano amarillo con diferente origen geográfico, además de los de la región central de México. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivos: 1) estimar la magnitud de la aptitud combinatoria general (ACG) de un grupo de variedades de maíz de grano amarillo, la aptitud combinatoria específica (ACE) de sus cruas y determinar el tipo de acción génica predominante en la expresión de caracteres agronómicos, al considerar variedades de maíz de grano amarillo con origen geográfico diverso; 2) determinar la presencia y la magnitud de EMat y ERec en los caracteres, y 3) estimar la magnitud de la heterosis con respecto al progenitor medio (H_{PM}) del rendimiento en las cruas intervarietales. El estudio proporcionará información para seleccionar los mejores genotipos e incluirlos en un programa de mejoramiento genético de maíces de grano amarillo para los Valles Altos de México, y en un mediano plazo desarrollar variedades de polinización libre e híbridos convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

Los experimentos se establecieron en las localidades de Ayapango, Estado de México (19° 08' 11" LN y 98° 48' 30" LO, a 2430 msnm) con temperatura media anual de 14.2 °C y precipitación media anual de 804.7 mm, y en Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 27' 38" LN y 98° 54' 11" LO, a 2250 msnm), con temperatura media anual de 15 °C y precipitación media anual de 645 mm (García 2004).

Material genético

En el año 2018 se evaluaron 32 variedades de maíz de grano amarillo de la región central de México junto con otras procedentes de altitud intermedia de los estados de Guerrero y Michoacán, y se seleccionaron las ocho mejores con base al rendimiento y características de interés agronómico. En el año 2019 se realizaron los cruzamientos dialélicos intervarietales de forma directa y recíproca. En el año 2020 se evaluaron 56 cruza intervarietales F_1 (C-1, C-2, ..., C-56) y las ocho variedades progenitoras: Reynoso 1 (Prog-1: Sintético Amarillo II de ocho progenitores, de clima templado), Noel 2 (Prog-2: Amarillo Toro Raza Vandeño, de clima cálido), Castillo 4 (Prog-3: población de la Raza Chalqueño, de clima templado), Noel 3 (Prog-4: Sintético Amarillo Ocotito Raza Cristalinos del Caribe, de clima cálido), Carrera 2 [Prog-5: híbrido Chapingo 622: (4A × 6A) × CML-486, de clima de transición], Reynoso 3 (Prog-6: Sintético Amarillo I de ocho progenitores, de clima templado), Arahón 1 (Prog-7: población HQ-15 25# Sel. Pob. Ama., de clima templado) y AGil 1 (Prog-8: población Tlax-CP-15 CPue-215 Am. Ts., de clima templado).

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de dos surcos de 5 m de largo y 0.8 m entre surcos. La distancia entre plantas fue de 0.5 m. Se sembraron tres semillas por golpe y después se aclaró a dos plantas para obtener una densidad de población de 55, 000 plantas ha^{-1} .

Manejo agronómico

En Ayapango la siembra se realizó el 28 de abril de 2020 en condiciones de temporal. La dosis de fertilización utilizada fue de 80-40-20 de N-P-K con urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60) en una sola aplicación a los 45 días después de la siembra (dds). En Montecillo se sembró el 14 de mayo de 2020 en condiciones de temporal con tres riegos de auxilio en la germinación, emergencia y floración. La dosis de fertilización utilizada fue 160-80-00 de N-P-K con urea

y fosfato diamónico como fuentes de fertilizantes. Se aplicó todo el P y la mitad del N en la siembra y el resto del N a los 45 dds. En ambas localidades, el control de maleza se realizó con una aplicación de los herbicidas Primagram® Gold (Atrazina + S-metolaclo) en preemergencia y Marvel® (Dicamba + Atrazina) en postemergencia, ambos con dosis de 3 L ha^{-1} .

VARIABLES EVALUADAS

Los caracteres que se midieron fueron altura de planta (AP en cm) de la base del tallo al inicio de la espiga, longitud de grano (LG en cm) promedio de 10 granos alineados longitudinalmente, peso de 100 granos (P100G en g) de la parte central de cada mazorca, días a floración femenina (DFF en días) cuando el 50% de las plantas tenía el jilote con estigmas expuestos, coeficiente de desgrane (CD = peso de granos de la mazorca/peso de la mazorca), índice de prolificidad (IP = número de mazorcas totales/número de plantas totales) y el rendimiento de grano (REN en $t ha^{-1}$) de acuerdo con la metodología propuesta por el CIMMYT (2012).

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza a través de ambientes, de acuerdo con el Método 1 (dialélico completo) de Griffing (1956) y se estimó la ACG, ACE, EMat, ERec, bajo el siguiente modelo estadístico:

$$y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + m_i - m_j + r_{ij} + e_{ijk}$$

Dónde: y_{ijk} es el valor fenotípico observado de la cruza con los progenitores i y j en el bloque k ; g_i y g_j son los efectos de aptitud combinatoria general de los progenitores i y j ; s_{ij} es el efecto de aptitud combinatoria específica de la cruza ij ; m_i y m_j son los efectos maternos de los progenitores i y j ; r_{ij} son los efectos de interacción recíprocos de la cruza ij ; e_{ijk} es el efecto aleatorio de la observación ijk . El análisis estadístico se realizó con el paquete estadístico SAS® versión 9.4 (SAS Institute Inc. 2016).

Para la comparación de efectos por la prueba de Tukey, la DSH para ACG se aplicó la siguiente consideración: $var(g_i) = \frac{p-1}{2p^2r} CME$, donde p es el número de progenitores y r el número de observa-

ciones para la estimación de cada efecto g_i . Para la DSH de ACE se aplicó: $var(s_{ij}) = \frac{1}{2p^2r}(p^2 - 2p + 2)CME$ para $i \neq j$, y $var(s_{ii}) = \frac{(p-1)^2}{p^2r}CME$, para ACE de progenitores (Griffing 1956). El cálculo de la heterosis con respecto al progenitor medio se calculó con la fórmula: $H_{PM} = \frac{F_1 - (\frac{P_i + P_j}{2})}{(\frac{P_i + P_j}{2})} \times 100$, donde F_1 es la media fenotípica de la crucea, P_i y P_j es la media fenotípica del progenitor i y del progenitor j (Falconer y Mackay 1996).

RESULTADOS

Análisis de varianza

En la Tabla 1 se muestran los cuadrados medios de los análisis de varianza de siete caracteres agronómicos y significancias de la evaluación de las cruza dialélicas entre ocho progenitores de maíz de grano amarillo. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre Ambientes, Genotipos, ACG, ACE, EMat, así como en las interacciones Genotipos \times Ambientes y ACG \times Ambientes en la mayoría de las variables. Entre Ambientes hubo diferencias para AP, CD, LG y REN. En Genotipos, ACG, ACE hubo diferencias para todos los caracteres. En EMat, Genotipos \times Ambientes, ACG \times Ambientes en todas las variables, excepto en CD. Por otro lado, en ERec únicamente hubo diferencias en DFF e IP. En ACE \times Ambientes para LG y DFF y en ERec \times Ambientes solo en DFF. Cabe destacar que los coeficientes de variación fueron bajos, es decir, se tiene confiabilidad en los datos, lo que respalda los resultados. Por lo tanto, la expresión fenotípica diferencial de las variables evaluadas es debido al genotipo, al ambiente y la interacción de ambos factores.

Promedio de caracteres evaluados y efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de progenitores

En la Tabla 2 se muestran los promedios y efectos de ACG de los progenitores para los siete caracteres. En la variable REN el Prog-7 y Prog-8 sobresalen y fueron estadísticamente superiores ($P \leq 0.05$) al resto de progenitores, para CD sobresalen

Prog-3 y Prog-8, para P100G el Prog-8, para AP el Prog-3, para LG el Prog-8, para DFF el Prog-4 y Prog-5 y para IP sobresalen el Prog-2 y Prog-4. De todos los progenitores evaluados el Prog-8 sobresale en el mayor número de caracteres: REN, CD, P100G y LG, características favorables que transfiere a su descendencia. El Prog-1 y Prog-6 pueden ser valiosos para reducir la altura de planta y para disminuir el ciclo del cultivo, el Prog-8.

Promedio de caracteres evaluados y efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) en cruza

En la Tabla 3 se muestran las cinco cruza con mayor efecto en ACE y las cinco cruza con menor efecto de ACE para rendimiento de grano, así como los efectos de ACE de los otros seis caracteres agronómicos de manera correspondiente. Las cinco mejores cruza destacan tanto para REN como para CD, P100G, AP, LG e IP; además de ser las más precoces, por tener menor DFF. De las 56 cruza evaluadas (datos no mostrados), el 28.5% sobresalió para REN, CD, P100G, AP, LG y todas presentan efectos de ACE negativos en DFF, lo que indica que tienen alto rendimiento por las características mencionadas y su ciclo biológico disminuyó. Para el caso de las peores cruza, tienen bajo rendimiento y alargaron su ciclo biológico.

Efectos maternos (EMat) en progenitores

En la Tabla 4 se muestran los EMat en las variedades progenitoras para los siete caracteres. Para REN, P100G y LG sobresale el Prog-6 con los mayores valores, para CD el Prog-3, para AP el Prog-7, para DFF el Prog-2 y para IP el Prog-4, lo que indica que dichos progenitores tienen un aporte extra de ADN citoplasmático favorable.

Heterosis en el rendimiento de grano

En la Tabla 5 se muestra la heterosis para el rendimiento, en porcentaje con respecto al progenitor medio en las cruza, y en la diagonal se presenta el comportamiento *per se* de las variedades progenitoras. La heterosis para el rendimiento varió en un intervalo de -2.9 a 111.7%, con promedio de 48.0%, y en la mayoría de las cruza se presentó he-

Tabla 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para siete características agronómicas en genotipos de maíz de grano amarillo.

Fuente de variación	GL	AP	CD	LG	P100G	DFF	REN	IP							
Ambientes	1	207523.8	**	0.0389	*	0.092	**	170.6	<i>ns</i>	56396.0	<i>ns</i>	82.2	**	0.19	<i>ns</i>
Bloque/Ambientes	4	1545.6	**	0.0044	**	0.004	<i>ns</i>	30.6	*	57.6	**	2.1	*	0.05	**
Genotipos	63	2878.8	**	0.0066	**	0.080	**	94.7	**	336.0	**	6.3	**	0.06	**
ACG	7	20069.5	**	0.0507	**	0.611	**	579.8	**	2570.8	**	5.2	**	0.09	**
ACE	28	1047.4	**	0.0015	**	0.022	**	50.4	**	57.7	**	12.0	**	0.08	**
EMat	7	759.6	**	0.0009	<i>ns</i>	0.012	**	45.6	**	121.3	**	1.2	*	0.03	*
ERec	21	296.7	<i>ns</i>	0.0006	<i>ns</i>	0.003	<i>ns</i>	8.4	<i>ns</i>	33.7	**	0.6	<i>ns</i>	0.02	**
Genotipos × Ambientes	63	471.5	**	0.0005	<i>ns</i>	0.009	**	27.8	**	34.5	**	2.5	**	0.02	**
ACG × Ambientes	7	2789.0	**	0.0012	<i>ns</i>	0.040	**	163.5	**	189.5	**	18.0	**	0.08	**
ACE × Ambientes	28	199.1	<i>ns</i>	0.0002	<i>ns</i>	0.006	*	14.2	<i>ns</i>	13.2	*	0.6	<i>ns</i>	0.01	<i>ns</i>
EMat × Ambientes	7	266.0	<i>ns</i>	0.0005	<i>ns</i>	0.006	<i>ns</i>	12.3	<i>ns</i>	16.1	<i>ns</i>	1.0	<i>ns</i>	0.01	<i>ns</i>
ERec × Ambientes	21	130.6	<i>ns</i>	0.0006	<i>ns</i>	0.003	<i>ns</i>	5.9	<i>ns</i>	17.5	**	0.5	<i>ns</i>	0.01	<i>ns</i>
Error	280	222.2		0.0006		0.004		9.9		8.6		0.7		0.01	
Coefficiente de variación (%)		6.4		2.9		4.8		10.3		3.0		14.9		10.2	

GL: grados de libertad, AP: altura de planta, CD: coeficiente de desgrane, LG: longitud de grano, P100G: peso de 100 granos, DFF: días a floración femenina, REN: rendimiento de grano, IP: índice de prolificidad, Bloque/Ambientes: bloque anidado a ambientes, ACG: aptitud combinatoria general, ACE: aptitud combinatoria específica, EMat: efectos maternos, ERec: efectos recíprocos. **: $P \leq 0.01$, *: $P \leq 0.05$, *ns*: no significativo.

Tabla 2. Promedios y efectos de aptitud combinatoria general de siete caracteres agronómicos de ocho variedades progenitoras de maíz de grano amarillo.

Prog	REN		CD		P100G		AP		LG		DFF		IP	
	$t\ ha^{-1}$	ACG	ACG	ACG	g	ACG	cm	ACG	cm	ACG	días	ACG	ACG	ACG
Prog-1	5.4	0.05 ^b	0.82	-0.013 ^c	30.0	-0.02 ^c	216.2	-10.9 ^e	1.21	-0.033 ^d	92.7	-4.3 ^d	1.08	0.005 ^b
Prog-2	5.3	-0.01 ^b	0.82	-0.008 ^c	29.1	-0.92 ^c	233.8	6.7 ^c	1.23	-0.006 ^c	101.4	4.4 ^b	1.11	0.029 ^a
Prog-3	5.3	-0.04 ^b	0.87	0.037 ^a	29.2	-0.82 ^c	254.9	27.8 ^a	1.33	0.092 ^b	97.7	0.7 ^c	1.08	0.005 ^b
Prog-4	4.9	-0.44 ^c	0.81	-0.023 ^d	27.9	-2.06 ^d	219.2	-8.0 ^d	1.16	-0.083 ^e	103.8	6.8 ^a	1.12	0.042 ^a
Prog-5	5.3	-0.01 ^b	0.81	-0.020 ^d	26.8	-3.19 ^e	216.4	-10.7 ^d	1.15	-0.086 ^e	103.2	6.2 ^a	1.10	0.007 ^b
Prog-6	5.2	-0.11 ^b	0.83	-0.003 ^b	30.0	0.03 ^c	215.3	-11.8 ^e	1.21	-0.031 ^d	93.0	-4.1 ^d	1.06	-0.017 ^b
Prog-7	5.5	0.18 ^a	0.84	0.001 ^b	32.5	2.52 ^b	220.9	-6.2 ^d	1.25	0.008 ^b	92.9	-4.1 ^d	1.06	-0.015 ^b
Prog-8	5.7	0.37 ^a	0.87	0.031 ^a	34.5	4.47 ^a	240.3	13.2 ^b	1.38	0.140 ^a	91.3	-5.7 ^e	1.02	-0.056 ^c
DSH		0.25		0.007		0.97		4.6		0.019		0.9		0.034

Letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Prog: progenitor, REN: rendimiento de grano, CD: coeficiente de desgrane, P100G: peso de 100 granos, AP: altura de planta, LG: longitud de grano, DFF: días a floración femenina, IP: índice de prolificidad, ACG: efectos de aptitud combinatoria general, DSH: diferencia significativa honesta.

Tabla 3. Promedios y efectos de aptitud combinatoria específica de siete caracteres agronómicos de las cinco mejores y cinco peores cruza divergentes de maíz de grano amarillo.

Cruza [†]	Prog		REN		CD		P100G		AP		LG		DFF		IP	
	P _f	P _m	$t\ ha^{-1}$	ACE	ACE	ACE	g	ACE	cm	ACE	cm	ACE	días	ACE	ACE	ACE
C-14	2	8	7.1	1.34 ^a	0.86	0.006 ^a	36.7	3.1 ^a	255.7	8.8 ^a	1.41	0.03 ^a	93.6	-2.1 ^b	1.19	0.14 ^a
C-28	4	8	6.6	1.26 ^a	0.85	0.007 ^a	34.5	2.0 ^a	248.3	16.0 ^a	1.33	0.03 ^a	95.6	-2.5 ^b	1.19	0.12 ^a
C-35	5	8	6.9	1.15 ^a	0.86	0.020 ^a	32.7	1.4 ^a	234.2	4.6 ^a	1.33	0.03 ^a	94.8	-2.8 ^b	1.06	0.03 ^b
C-1	1	2	6.4	1.02 ^a	0.83	0.020 ^a	30.3	1.1 ^a	229.5	6.6 ^a	1.25	0.05 ^a	96.8	-0.3 ^b	1.17	0.05 ^a
C-33	5	6	6.2	0.95 ^a	0.80	-0.011 ^a	27.7	0.8 ^a	210.3	5.7 ^a	1.15	0.02 ^a	98.3	-0.9 ^b	1.12	0.05 ^a
C-25	4	5	4.4	-0.58 ^c	0.78	-0.006 ^b	23.5	-1.3 ^b	210.1	1.6 ^b	1.05	-0.03 ^b	110.8	0.8 ^a	1.07	-0.05 ^b
C-6	1	7	4.9	-0.71 ^c	0.81	-0.009 ^b	31.8	-0.7 ^b	202.4	-7.6 ^b	1.18	-0.04 ^b	89.8	1.2 ^a	0.99	-0.07 ^c
C-5	1	6	4.6	-0.72 ^c	0.81	-0.007 ^b	28.7	-1.4 ^b	201.5	-2.9 ^b	1.15	-0.03 ^b	88.7	0.0 ^a	0.99	-0.07 ^c
C-10	2	4	4.0	-0.89 ^c	0.80	0.002 ^b	25.1	-1.9 ^b	215.9	-9.9 ^c	1.12	-0.03 ^b	108.6	0.5 ^a	1.04	-0.11 ^c
C-21	3	8	4.3	-1.43 ^d	0.89	-0.014 ^b	31.7	-2.0 ^b	259.7	-8.4 ^b	1.43	-0.04 ^b	93.3	1.3 ^a	0.87	-0.16 ^c
DSH				0.67		0.0206		2.6		12.3		0.05		2.4		0.09

[†]Debido al modelo estadístico utilizado, las cruza directas y recíprocas tienen el mismo valor de ACE, por lo tanto, únicamente se mencionan las cruza directas. Letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Prog: progenitor, P_f: progenitor femenino, P_m: progenitor masculino, REN: rendimiento de grano, CD: coeficiente de desgrane, P100G: peso de 100 granos, AP: altura de planta, LG: longitud de grano, DFF: días a floración femenina, IP: índice de prolificidad, ACE: efectos de aptitud combinatoria específica, DSH: diferencia significativa honesta.

Tabla 4. Efectos maternos de siete caracteres agronómicos de variedades progenitoras de maíz de grano amarillo.

Prog	REN (t ha ⁻¹)	CD	P100G (g)	AP (cm)	LG (cm)	DFF	IP
Prog-1	-0.21	0.0016	0.1417	-5.24	0.0002	-2.07	-0.0342
Prog-2	0.02	-0.0019	0.0458	2.52	0.0041	1.30	0.0066
Prog-3	0.03	0.0041	0.2479	0.32	0.0063	0.05	0.0022
Prog-4	0.07	-0.0045	-0.0771	-0.37	-0.0113	0.94	0.0327
Prog-5	0.09	-0.0005	-0.2583	2.33	-0.0044	1.10	0.0066
Prog-6	0.13	0.0032	1.3646	-2.76	0.0230	-0.78	-0.0039
Prog-7	0.01	-0.0032	-1.0729	2.85	-0.0100	-0.20	-0.0020
Prog-8	-0.14	0.0013	-0.3917	0.34	-0.0079	-0.34	-0.0080

Prog: progenitor, REN: rendimiento de grano, CD: coeficiente de desgrane, P100G: peso de 100 granos, AP: altura de planta, LG: longitud del grano, DFF: días a floración femenina, IP: índice de prolificidad.

Tabla 5. Comportamiento *per se* del rendimiento de grano (t ha⁻¹) en variedades progenitoras y heterosis (%) con respecto al progenitor medio en cruzas directas y cruzas recíprocas divergentes de maíz de grano amarillo.

Prog	Prog-1	Prog-2	Prog-3	Prog-4	Prog-5	Prog-6	Prog-7	Prog-8	Prom
Prog-1	4.75	56.9	37.3	44.2	50.5	1.0	-2.9	19.7	25.8
Prog-2	79.5	2.92	51.9	35.0	88.0	67.2	69.3	99.4	61.3
Prog-3	39.1	73.1	3.73	66.2	94.1	51.0	33.5	18.9	47.0
Prog-4	31.0	38.3	71.4	3.00	55.4	47.1	52.1	96.5	49.0
Prog-5	80.3	82.6	111.3	64.1	2.47	96.8	55.6	111.7	75.3
Prog-6	17.5	78.3	60.4	49.4	106.7	3.69	29.2	46.8	48.5
Prog-7	6.8	57.6	35.7	34.3	61.9	26.3	4.89	30.8	31.7
Prog-8	33.6	98.9	-1.7	669.9	103.2	44.6	16.5	4.19	45.6
Prom	36.0	60.7	45.8	45.4	70.0	41.7	31.6	53.0	MG = 48.0

Prog: progenitor, Prom: promedio, MG: media general. Comportamiento *per se* de progenitores (diagonal), heterosis de cruzas directas (arriba de la diagonal) y heterosis de cruzas recíprocas (debajo de la diagonal).

terosis positiva; es decir, hubo rendimiento superior con respecto al promedio de cada par de progenitores, tanto en las cruzas directas como en las recíprocas. Las cruzas con mayor heterosis tuvieron progenitores divergentes, con valores *per se* contrastantes y al menos uno de ellos tuvo de valor medio a alto de ACG. Las variedades adaptadas a la zona de estudio tuvieron mejor comportamiento *per se*.

DISCUSIÓN

Análisis de varianza

La significancia entre genotipos en el análisis de varianza indica expresión fenotípica diferencial para los caracteres agronómicos; lo anterior, se debe a la variabilidad genética relevante en el uso de progenitores divergentes y al tipo de acción génica de cada característica. Con respecto a la significancia entre los ambientes, indica que las condiciones ecológicas determinadas por una diferencia de 180 m en altitud pueden influir de manera relevante sobre la

expresión de las plantas de maíz con relación a áreas con altitudes menores, aunque sean del mismo tipo de clima. La reacción diferencial al ambiente entre genotipos es causada por la interacción Genotipos × Ambientes, e indica que los genotipos sobresalientes en un ambiente, no necesariamente lo serán en otro ambiente, debido a la adaptación climática de los progenitores.

La significancia de ACG y ACE indican la presencia de efectos génicos tanto aditivos como no aditivos, en la expresión de los caracteres. Dado que los cuadrados medios de los efectos de ACG fueron mayores que los de ACE, se deduce que los efectos genéticos aditivos son de mayor importancia en los caracteres, excepto en REN e IP. Esto sugiere realizar mejoramiento poblacional en las variedades sobresalientes para acumular alelos favorables y aprovechar el efecto aditivo de los caracteres. Posteriormente, se puede incluir la selección recíproca recurrente o hibridación, para aprovechar los efectos no aditivos.

La significancia de los cuadrados medios para EMat y ERec indican que hay progenitores femeninos que además de la contribución de ADN nuclear, pueden aportar ADN citoplasmático favorable para la expresión de los caracteres agronómicos, excepto en CD, lo que determina diferente expresión de cruza directa vs. recíprocas. Por otro lado, la no significancia para ERec, excepto para DFF e IP, pudiera indicar que hay interacciones de ADN nuclear y ADN citoplasmático, también conocidos como efectos no maternos (Cockerham 1963) lo cual ocurre sólo en el progenitor femenino. Por su parte, Hernández-Trejo *et al.* (2023) encontraron efectos recíprocos para días a floración masculina y DFF. Por lo que puede ser importante seleccionar adecuadamente el progenitor femenino para no alterar el comportamiento agronómico en los genotipos.

Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) en progenitores y efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) en cruza

La ACG valora al comportamiento promedio de un progenitor en combinaciones híbridas, a través de cruzamientos con progenitores diferentes (Sprague y Tatum 1942) y los efectos genéticos responsables son los aditivos (Hallauer *et al.* 2010). Valores altos de ACG indican que el progenitor pudiera presentar alta frecuencia de alelos favorables a través de los loci que determinen el carácter, lo cual se refleja a través de generar buenos cruzamientos; lo contrario, ACG negativos, indican que los alelos en esos progenitores son los menos favorables para la expresión del carácter. Con base a este planteamiento, el Prog-8 destacó con los valores promedios y efectos de ACG mayores para REN, CD, P100G y valores bajos en DFF, lo que indica que confiere buenas características de mazorca, grano, precocidad y mayor rendimiento a su descendencia; caso contrario ocurre con el Prog-4, que tuvo los promedios más bajos y efectos de ACG en REN, CD, P100G, AP, LG e IP y altos en DFF. Cabe destacar que el origen de ambos progenitores es diferente, el primero proviene de clima templado y el segundo de clima cálido. Al respecto, De Souza *et al.* (2009) mencionan que el medio ambiente influye de manera diferente en el comportamiento de los pro-

genitores y por lo consecuente, en el valor de ACG. Lo cual provoca una contribución diferenciada en la expresión fenotípica de su descendencia. Lo anterior, se refleja en la interacción ACG \times Ambientes, al indicar que los efectos de ACG fueron diferentes en cada ambiente de evaluación para AP, LG, P100G, DFF, IP y REN. En general, los progenitores de clima templado tuvieron mejor desempeño debido a que la evaluación se realizó en una zona de clima templado. Se espera que los progenitores con alta ACG formen cruza con rendimiento superior, debido a la interacción de alelos favorables y los progenitores de baja ACG, originarán cruza poco sobresalientes.

La ACE se refiere al efecto en donde ciertas combinaciones híbridas se expresan mejor o peor de lo esperado, con base en el comportamiento promedio de sus progenitores (Sprague y Tatum 1942) y predominan los efectos de interacción de dominancia y epistáticos de los genes, conocidos conjuntamente como efectos no aditivos (Hallauer *et al.* 2010). Valores bajos de ACE indica que los híbridos presentan un comportamiento por debajo de cómo se esperaría sobre la base de la ACG de ambos progenitores, y un valor alto de ACE indica que la interacción agrega mejoras al comportamiento de la cruza por la aportación de la ACG de sus progenitores. Es decir, algunas combinaciones funcionan mejor y otras peor de lo esperado. Los resultados obtenidos concuerdan en lo general con lo señalado anteriormente, ya que hay cruza con ACE alta (positiva) y baja (negativa); aunque comparándolo con el valor promedio de cada variable, no necesariamente fueron las cruza sobresalientes. Esto ocurre porque en las cruza intervienen los tipos de acción génica aditiva \times dominante y dominante \times dominante (Hasan *et al.* 2014). Del total de las variables, REN fue la única variable en que los efectos de ACE fueron más importantes en la expresión de este carácter, resultados similares encontraron De la Cruz-Lázaro *et al.* (2010) y Cervantes-Ortiz *et al.* (2018), quienes mencionan que la acción génica no aditiva es la más importante en el rendimiento en maíz. Del total de las cruza, 16 resultaron sobresalientes en REN, de las cuales el 50% fueron cruza directas y el otro 50% las cruza recíprocas; por lo tanto, tienen el mismo

valor de ACE, debido al modelo utilizado y la descomposición por los factores de variación. Así mismo, los progenitores utilizados en estas cruzas pueden utilizarse como hembra o macho. Además, dichas cruzas también sobresalieron por tener efectos de ACE altos para REN, CD, P100G, AP, LG, IP y efectos negativos para DFF, lo que indica que poseen buenas características de mazorca, grano y planta; por lo tanto, tienen mayor rendimiento y son más precoces que sus progenitores, características importantes en los ambientes de evaluación por la presencia de heladas, variación climática y edáfica, y precipitación errática como la zona de Valles Altos de México. Caso contrario ocurre con las cinco peores cruzas, que tiene valores negativos para REN, CD, P100G, AP, LG, IP y positivos para DFF, lo que provoca que tengan bajo rendimiento y sean más tardías. Cabe destacar que las mejores cruzas con alta ACE tienen progenitores divergentes, provenientes de áreas con condiciones ecológicas diferentes, como las cruzas C-14: Noel 2 × AGil 1 (cálido × templado), C-35: Carrera 2 × AGil 1 (transición × templado) y C-1: Reynoso 1 × Noel 2 (templado × cálido); en tanto que, las peores cruzas se formaron a partir de progenitores poco divergentes y son de ambiente similar, como las cruzas C-5: Reynoso 1 × Reynoso 3 (templado × templado) y C-10: Noel 2 × Noel 3 (cálido × cálido), lo cual hace que no fueran sobresalientes. De igual manera, en las cruzas sobresalientes se presentaron las siguientes situaciones con respecto al valor de la ACG de los progenitores, la craza C-14 (un progenitor tiene ACG intermedia y otro alta), C-28 (un progenitor tiene ACG alta y otro baja) y C-1 (ambos progenitores tienen ACG intermedia), lo que indica que para que haya alta ACE en las cruzas, se necesita al menos un progenitor con valores de ACG intermedios a altos, dichas cruzas podrían considerarse para realizar mejoramiento por hibridación. En relación al efecto de interacción ACE × Ambientes no fue significativo para AP, CD, P100G, IP y REN para el comportamiento de las cruzas, excepto en LG y DFF, lo que indica que en las cruzas el efecto de ACE fue diferente en los ambientes, por la variación ambiental presentada en los ambientes de evaluación y por el comportamiento de los progeni-

tores.

Los efectos de ACG y ACE se han reportado como importantes y variables en diferentes características agronómicas, morfológicas y componentes de rendimiento por diferentes autores, tales como Rodríguez-Pérez *et al.* (2023) quienes reportaron efectos de ACG de -0.46 a 3.52 para DFF, de -1.55 a 0.90 para REN, y efectos de ACE de -1.35 a 7.62 para DFF y de -0.48 a 1.06 para REN. Así como valores de ACE de -1.3055 a 0.3264 para DFF (Hernández-Trejo *et al.* 2023). Así mismo, valores de ACG de -0.4879 a 0.5853 y valores de ACE de -0.4265 a 0.3172 para REN (Jasso-Bobadilla *et al.* 2022). De igual manera, en maíz de grano amarillo Chacma y Chura (2022) encontraron valores de ACG de -12.0 a 17.5 para AP, de -0.8 a 1.4 para REN, y valores de ACE de -38.7 a 35.2 para AP y de -3.9 a 2.3 para REN. De igual manera, Chura y Huanuqueño (2015) obtuvieron valores de ACE de -29.91 a 8.94 para AP, de -9.03 a 1.22 para DFF y de 19.59 a 2536.96 para REN. Así mismo, se han reportado valores de ACG de -1.24 a 0.89 para DFF, de -5.32 a 6.61 para AP, de -3.83 a 3.38 para REN, y valores de ACE de -1.58 a 1.58 para DFF, de -7.96 a 7.96 para AP y de -3.972 a 3.972 para REN (Aly 2013). Los resultados obtenidos en el presente estudio están dentro de los intervalos mencionados y son amplias; sin embargo, algunas variables evaluadas siguen las mismas tendencias a lo reportado por otros estudios.

Efectos maternos (EMat) en progenitores

Los efectos maternos son contribuciones del progenitor femenino a su descendencia, más allá de la contribución cromosómica (ADN nuclear) equitativa esperada de cada progenitor (Roach y Wulff 1987). Los resultados aquí obtenidos concuerdan con los planteamientos señalados, ya que las diferentes variedades al utilizarse como progenitor femenino tienen diferentes aportaciones de efectos maternos en la expresión de los caracteres. En las cruzas que involucraron al Prog-6 como progenitor femenino, la descendencia tuvo mayor rendimiento y mejores características en mazorca, de grano, así como plantas más bajas y precoces por el aporte extra de ADN citoplasmático de dicho progenitor.

Los efectos maternos en las características agronómicas, morfológicas y de rendimiento se han estudiado poco en maíz porque no son significativos (Sánchez-Ramírez *et al.* 2017) y la mayoría no los incluye porque se consideran poco relevantes; en contraste, Hernández-Trejo *et al.* (2023) encontraron efectos maternos con valores de -0.72 a 0.5139 para floración masculina y de -0.5208 a 0.5416 para DFF, y Jumbo y Carena (2008) encontraron efectos maternos en la altura de mazorca. Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran lo contrario, ya que se obtuvo significancia en las características evaluadas, excepto para CD y presentan valores positivos; aunque de baja magnitud, pero que influyen en la expresión fenotípica de los caracteres de su descendencia. Razón por la cual, es importante evaluarlos siempre que sea posible. Por su parte Fan *et al.* (2014) consideran importantes a los efectos maternos en maíz, dado que el rendimiento de grano está determinado ampliamente por el endospermo.

Heterosis en el rendimiento de grano

La heterosis es el aumento en el vigor, tamaño, fecundidad, velocidad de desarrollo, resistencia a enfermedades y plagas o a factores climáticos de la progenie (Shull 1952), es decir, los hijos son mejores que sus progenitores. La expresión de la heterosis depende de la divergencia genética de los progenitores, por lo que a mayor divergencia se espera una mayor heterosis (Moll *et al.* 1965). En ese sentido, las cruzas con mayor expresión de heterosis tuvieron progenitores divergentes (C-14), que resultaron en buenas combinaciones y complementación alélica. Además, la expresión de la heterosis también se debió a que los progenitores tuvieron valores *per se* contrastantes (C-35) o que al menos uno de ellos tuvo valor de ACG de medio a alto (C-28). Además, presentaron los mayores valores de ACE tal como lo mencionan Morales *et al.* (2007), debido a la acción génica de los efectos no aditivos en la combinación de los progenitores, y tienen en común al Prog-8 como progenitor macho y fue el que presentó mayor ACG. La expresión de la heterosis en las cruzas intervarietales está relacionada con el grado de adaptación, del mejoramiento genético previo de

los progenitores y de la divergencia genética de los mismos.

La expresión de la heterosis en el rendimiento de los genotipos varía de acuerdo con el tipo de germoplasma utilizado y con el efecto del ambiente. Muchas investigaciones se han realizado para conocer la magnitud de la heterosis en el rendimiento, tales como el de Sierra-Macías *et al.* 2023 quienes revelaron un intervalo de -9-19 a 3.22% en cruzas varietales; así como, Cervantes-Adame *et al.* 2020 quienes encontraron intervalos de -5.71 a 5.36% en cruzas de poblaciones nativas. De igual manera Velasco-García *et al.* (2019) obtuvieron un promedio de 5.68 y un intervalo de -11.03 a 26.19% en maíz adaptado a Valles Altos, y Sun *et al.* (2018) reportaron un intervalo de -26.89 a 21.48% en líneas de maíz. También en maíz amarillo García *et al.* (2020) reportaron un intervalo de heterosis para REN de 121.37 a 454.43% y Chura y Huanuqueño (2015) encontraron valores de -2.62 a 25.44%. La amplitud de la heterosis encontrada en las cruzas evaluadas es amplia y superior a la reportada para Valles Altos, debido al uso de poblaciones divergentes como progenitores, y en su mayoría fue positiva. La heterosis reportada para maíces de los Valles Altos es de 18.2% (Vasal *et al.* 1995). Aunque Miranda (1999) menciona que la heterosis no debería exceder el 20% al usar poblaciones de amplia base genética no consanguíneas. En este caso, sucedió lo contrario al obtener heterosis mayor al 20% inclusive mayor al 100% en algunas cruzas. Al respecto Wong *et al.* (2007) mencionan que el uso de progenitores divergentes incrementa el rendimiento y sus componentes. Por lo tanto, a partir de estos resultados, la obtención de híbridos intervarietales es factible por el buen desempeño en el rendimiento y los progenitores de los mejores híbridos pueden usarse para la generación de líneas puras que integren nuevos patrones heteróticos para el desarrollo de híbridos convencionales.

Los resultados de la presente investigación muestran el potencial de rendimiento que existe en las variedades progenitoras y sus cruzas de maíz de grano amarillo evaluadas en la zona de Valles Altos de México. Las variedades pueden mejorarse por

selección para seguir acumulando genes o frecuencias génicas deseables o utilizarse de manera *per se*. Así mismo, pueden usarse como progenitores para el desarrollo de variedades comerciales mediante hibridación, así como utilizarse para ampliar la base genética del germoplasma de valles altos y mejorar el rendimiento de grano en los genotipos. Debido al tipo de acción génica exhibida, que fue aditiva, el mejoramiento poblacional de los mejores progenitores es también una opción viable, por la vía de selección intrapoblacional recurrente para la obtención de variedades de polinización libre, o mediante la vía de selección recíproca recurrente para el mejoramiento paralelo de pares de variedades complementarias para formación a mediano plazo de híbridos convencionales para nichos específicos de la región.

CONCLUSIONES

La magnitud de la aptitud combinatoria general y específica en las variedades y cruzas divergentes de maíz de grano amarillo evaluadas fueron significativas y amplias. El tipo de acción génica predominante en la expresión de los caracteres en los genotipos de maíz de grano amarillo evaluados es el aditivo. Se demostró la presencia de efectos maternos en todos los caracteres evaluados, excepto en el coeficiente de desgrane, aunque de baja magnitud, pero significativos. Además, de ausencia de efectos recíprocos, excepto para días a floración femenina e índice de prolificidad. La magnitud de la heterosis con respecto al progenitor medio en las cruzas divergentes de maíz de grano amarillo evaluadas es amplia para rendimiento de grano.

LITERATURA CITADA

- Abera W, Hussein S, Derera J, Worku M, Laing M (2016) Heterosis and combining ability of elite maize inbred lines under northern corn leaf blight disease prone environments of the mid-altitude tropics. *Euphytica* 208: 391-400.
- Aly RSH (2013) Relationship between combining ability of grain yield and yield components for some newly yellow maize inbred lines via line \times tester analysis. *Alexandria Journal of Agricultural Research* 58: 115-124.
- Cervantes-Adame YF, Rebolloza-Hernández H, Broa-Rojas E, Olvera-Velona A, Bahena-Delgado G (2020) Efecto de heterosis en poblaciones nativas de maíz y sus cruzas F_1 . *Biotecnia* 22: 11-19.
- Cervantes-Ortiz F, Hernández-Esparza J, García-Rodríguez JG, Rangel-Lucio JA, Andrio-Enríquez E, Mendoza-Elos M, Rodríguez-Pérez G, Rodríguez-Mercado D (2018) Aptitud combinatoria general y específica de caracteres agronómicos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) de baja endogamia. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 34: 33-42.
- Chacma AI, Chura CJ (2022) Habilidad combinatoria de líneas foráneas de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en condiciones de La Molina. *IDESIA (Chile)* 40: 63-72.
- Chura CJ, Huanuqueño CEH (2015) Comportamiento de ocho poblaciones de maíz amarillo (*Zea mays* L.) en cruzas con un probador. *Anales Científicos* 76: 78-86.
- CIMMYT (2012) Manual de determinación de rendimiento. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México. 36p.
- Cockerham CC (1963) Estimation of genetics variances. In: Hanson WD, Robinson HF (eds.) *Statistical genetics and plant breeding a Symposium and Workshop Sponsored by The Committee on Plant Breeding and Genetics of the Agricultural Board at the North Carolina State College*. Raleigh, N. C. USA. pp: 53-94.
- De la Cruz-Lázaro E, Castañón-Najera G, Brito-Manzano NP, Gómez-Vázquez A, Robledo-Torres V, Lozano del Río AJ (2010) Heterosis y aptitud combinatoria de poblaciones de maíz tropical. *Revista Internacional de Botánica Experimental* 79: 11-17.

- De Souza LV, Vieira MG, Cardoso GJC, Moreira GLJ, Dos Santos IC (2009) Combining ability of maize grain yield under different levels of environmental stress. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 44: 1297-1303.
- Díaz-Juárez RC, Santacruz-Varela A, Castillo-González F, Gómez-Montiel NO, García-Zavala JJ, Muñoz-Orozco A (2022) Cruzas intervarietales, alternativa para aumentar la producción de maíz (*Zea mays* L.) amarillo en ambientes variables. *Agrociencia* 56: 1278-1302.
- Falconer DS, Mackay TFC (1996) *Introduction to Quantitative Genetics*. Longman Group Ltd. Harlow, England. 464p.
- Fan XM, Zhang YD, Yao WH, Bi YQ, Liu L, Chen HM, Kang MS (2014) Reciprocal diallel crosses impact combining ability, variance estimation, and heterotic group classification. *Crop Science* 54: 89-97.
- García E (2004) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Quinta edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 97p.
- García MVM, Chura CJ, Torres J (2020) Aptitud combinatoria y heterosis para el rendimiento, precocidad y altura en genotipos de maíz amarillo. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)* 37: 410-429.
- Gardner CO, Eberhart SA (1966) Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics* 22: 439-452.
- Griffing B (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Science* 9: 463-493.
- Hallauer AR, Carena MJ, Miranda FJB (2010) *Quantitative genetics in maize breeding*. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. 663p.
- Hasan MJ, Kulsum MU, Rahman MM (2014) Combining ability of different yield related characters in rice. *SAARC Journal of Agriculture* 12: 143-153.
- Hernández-Trejo A, López-Santillán JA, Estrada-Drouaillet B, Reséndiz-Ramírez Z., Coronado-Blanco JM, Malvar RA (2023) Aptitud combinatoria y efectos recíprocos de la precocidad en poblaciones nativas de maíz de Tamaulipas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14: 171-183.
- Hernández-Vázquez B., Mendoza-Castillo MC, Castillo-González F, Pecina-Martínez JA, Delgado-Alvarado A, Lobato-Ortiz R, García-Zavala JJ (2018) Valoración agronómica de germoplasma de maíz amarillo en valles altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41: 393-402.
- Jasso-Bobadilla G, González-Huerta A, Pérez-López DJ, Franco-Martínez JRP, Rubí-Arriaga M, Mejía-Carranza J (2022) Uso de Opstat para validar resultados en un dialélico parcial con ocho líneas de maíz evaluadas en un ambiente. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13: 41-52.
- Jumbo MB, Carena MJ (2008) Combining ability, maternal, and reciprocal effects of elite early-maturing maize population hybrids. *Euphytica* 162: 325-333.
- Martínez-Yañez B, Tadeo-Robledo M, Benítez-Riquelme I, Vázquez-Carrillo G, Espinosa-Calderón A, Mejía-Contreras JA, et al. (2017) Productividad de híbridos no convencionales de maíz de endospermo amarillo para valles altos de México. *Agrociencia* 51: 635-647.
- Miranda FJB (1999) Inbreeding depression and heterosis. In: Coors JG, Pandey S (eds.) *Genetics and exploitation of heterosis in crops*. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp: 69-80.
- Moll RH, Lonquist JH, Vélez Fortuno J, Johnson EC (1965) The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics* 52: 139-144.

- Morales RMM, Ron PJ, Sánchez GJJ, Ramírez DJL, de la Cruz LL, Mena MS, Hurtado PS, Chuela BM (2007) Relaciones fenotípicas y heterosis entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 285-294.
- Roach DA, Wulff RD (1987) Maternal effects in plants. *Annual Reviews of Ecology and Systematics* 18: 209-235.
- Rodríguez-Pérez G, García-Ramírez A, Cervantes-Ortiz F, Andrio-Enríquez A (2023) Componentes genéticos bajo el diseño Carolina del Norte II en maíz (*Zea mays* L.) en el sur de Sonora, México. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences* 39: 1-11.
- Sánchez-Ramírez FJ, Mendoza-Castillo MC, Mendoza-Rodríguez M, Castillo-González F, Cruz-Izquierdo S, Castro-Nava S, Molina-Galán JD (2017) Aptitud combinatoria de líneas endogámicas para la producción de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruce simple en condiciones de riego. *Agrociencia* 51: 393-407.
- SAS Institute Inc. (2016) Base SAS® 9.4 Procedures guide: High-performance procedures. Sixth edition. SAS Institute Inc. Statistical Analysis System. Cary, NC, USA. 170p.
- Shull GF (1952) Beginnings of the heterosis concept. In: Gowen JW (ed.) *Heterosis*. Iowa State College Press. Ames, Iowa, USA. pp: 14-48.
- SIAP (2023) Expectativas Agroalimentarias 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. 64p.
- Sierra-Macías M, Rodríguez-Montalvo FA, Espinosa Calderón A, Tadeo-Robledo M, Andrés-Meza P, Gómez-Montiel N (2023) Adaptabilidad de cruces varietales de maíz en Veracruz y Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14: 327-337.
- Sprague GF, Tatum LA (1942) General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *Agronomy Journal* 34: 923-932.
- Sun J-y, Gao J-l, Yu X-f, Liu J, Su Z-j, Feng Y, Wang D (2018) Combining ability of sixteen USA maize inbred lines and their outbreeding prospects in China. *Agronomy* 8(12): 281. DOI: 10.3390/agronomy8120281.
- Vasal SK, Srinivasan G, Vergara AN, Castillo GF (1995) Heterosis y aptitud combinatoria en germoplasma de maíz de valles altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 18: 123-139.
- Velasco-García AM, García-Zavala JJ, Sahagún-Castellanos J, Lobato-Ortiz R, Sánchez-Abarca C, Marín-Montes IM (2019) Rendimiento, componentes de rendimiento y heterosis de germoplasma de maíz adaptado a valles altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42: 367-374.
- Wong RR, Gutiérrez RE, Palomo GA, Rodríguez HS, Córdova OH, Espinoza BA, Lozano GJ (2007) Aptitud combinatoria de componentes del rendimiento en líneas de maíz para grano en la Comarca Lagunera, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 181-189.