

## Aptitud combinatoria y efectos recíprocos de la precocidad en poblaciones nativas de maíz de Tamaulipas

Antonia Hernandez-Trejo<sup>1</sup>  
José Alberto López-Santillán<sup>1§</sup>  
Benigno Estrada-Drouaillet<sup>1</sup>  
Zoila Reséndiz-Ramírez<sup>1</sup>  
Juana María Coronado-Blanco<sup>1</sup>  
Rosa Ana Malvar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación-Facultad de Ingeniería y Ciencias-Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. CP. 87000. Tel. 834 3181721, ext. 2146. (resendizmorelos.mod4@gmail.com; antonyya.17@hotmail.com; benestrada@docentes.uat.edu.mx; jmcoronado@docentes.uat.edu.mx). <sup>2</sup>Misión Biológica de Galicia-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. A Carballeira 8, Salcedo, Pontevedra, España. CP. 36143. Tel. +34 986 854800. (rmalvar@mbg.csic.es).

§Autor para correspondencia: jalopez@docentes.uat.edu.mx.

### Resumen

La precocidad y adaptación del maíz nativo de Tamaulipas en ambientes restrictivos, permite considerarlo fuente de variabilidad para programas de mejoramiento genético, por ello es necesario conocer los efectos genéticos que controlan su variación. El objetivo fue determinar la acción génica que controla la variación de la precocidad de poblaciones de maíz nativo de Tamaulipas y la relación de la precocidad con el rendimiento de grano. En Güémez, Tamaulipas, en otoño-invierno 2019-2020 y primavera-verano 2020 con aplicación y no aplicación de insecticida para combatir *S. frugiperda*, se evaluaron los efectos genéticos de días a floración masculina y femenina de seis poblaciones de maíz, sus cruza directas y recíprocas, mediante un análisis dialélico con el método de Griffing, se analizó la correlación entre la floración y el rendimiento de grano. Para floración masculina y femenina no existieron efectos de aptitud combinatoria general y existieron efectos de aptitud combinatoria específica, recíprocos y maternos: la variación entre cultivares se explicó en 53% para floración masculina y 45% para femenina por efectos de aptitud combinatoria específica, para floración masculina 38% de la variación entre cultivares y 43% para femenina fue debida a efectos recíprocos. La variación entre cultivares, dependió de efectos no aditivos y existió herencia citoplasmática involucrada en su expresión. La precocidad se correlacionó positivamente con el rendimiento de grano en el ciclo primavera-verano sin aplicación de insecticida. Con aptitud combinatoria específica alta sobresalieron TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub>×VHA y Cam×VHA, para aprovechar los efectos recíprocos en Cam×VHA hay que considerar el orden de los progenitores.

**Palabras clave:** *S. frugiperda*, *Zea mays*, efectos maternos.

Recibido: enero de 2023

Aceptado: febrero de 2023

## Introducción

El maíz es una gramínea de importancia económica y amplia variabilidad genética y morfológica, se produce en todas las regiones agroecológicas de México. Lo cual favorece que este cultivo sea atacado por una amplia diversidad de insectos plaga en las regiones tropicales y subtropicales como el noreste de México, en donde destaca *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) o gusano cogollero (Fernández *et al.*, 2013; Yáñez *et al.*, 2019). Este insecto, en estado larval consume principalmente tejido foliar en desarrollo, lo que disminuye el área fotosintética de la planta y en consecuencia el rendimiento de grano (Neves *et al.*, 2020; Obok *et al.*, 2021).

Debido a lo anterior, se utilizan principalmente insecticidas sintéticos para su control (Burtet *et al.*, 2017), lo que puede provocar resistencia en el insecto, eliminación de especies no objetivo (Neves *et al.*, 2020) y contaminación ambiental (Guo *et al.*, 2020). Una alternativa para disminuir estos riesgos es la utilización de cultivares tolerantes al daño foliar provocado por *S. frugiperda* (Smith y Clement, 2011). Para la obtención de dichos cultivares mediante mejoramiento genético, se requiere identificar y disponer de germoplasma base con adaptación a condiciones agroecológicas específicas (Fuentes *et al.*, 1998).

Las regiones agrícolas productoras de maíz en Tamaulipas, como ocurre en gran parte del mundo, debido al cambio climático (Yujie *et al.*, 2021), presentan restricción de humedad, temperaturas extremas y un período de canícula interestival, donde la temperatura supera los 40 °C (Castro *et al.*, 2013). Lo que provoca disminución del ciclo de crecimiento en el cultivo (Luna *et al.*, 2005), generando la necesidad de utilizar cultivares con precocidad alta (Pecina-Martínez *et al.*, 2009), entre 50 y 70 días a floración, primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI), respectivamente.

La precocidad en el maíz se estima mediante los días desde la siembra a floración masculina y femenina (García *et al.*, 2020). Esta se relaciona con eficiencia fotosintética alta, distribución adecuada de asimilados, altura de planta menor (Dos Santos *et al.*, 2019) e índice de cosecha alto (Coutiño-Estrada *et al.*, 2014). Por lo cual, dentro de un programa de mejoramiento genético para la tolerancia del maíz al daño de *S. frugiperda* en el trópico seco, es conveniente utilizar la precocidad como criterio complementario de selección y evaluación (Preciado *et al.*, 2002).

Sin embargo, se considera que cultivares precoces presentan menor rendimiento que los tardíos, por esto, es necesario caracterizar en el germoplasma base, las relaciones específicas entre la precocidad y el rendimiento de grano, y conocer los efectos genéticos que controlan la expresión de la variación en la precocidad (Dzib-Aguilar *et al.*, 2011). Las poblaciones nativas del centro y sur de Tamaulipas, además de variabilidad amplia, poseen potencial de rendimiento alto, precocidad y adaptación a condiciones ambientales restrictivas (Pecina *et al.*, 2011), ya que se han desarrollado en los ambientes anteriormente descritos (González-Martínez *et al.*, 2020).

Por otra parte, para conocer de manera integral la acción génica que controla la variación del germoplasma base, se debe de realizar una evaluación fenotípica y genotípica, utilizando características que favorezcan la adaptación a las regiones agroecológicas específicas de interés (Ertiro *et al.*, 2017). En este sentido existen herramientas que ayudan a conocer los componentes genéticos que controlan la variación fenotípica de las poblaciones de maíz, lo que permite seleccionar el método de mejoramiento más apropiado (González *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2020).

Los diseños dialélicos se definen como un conjunto de cruzamientos simples entre un grupo de  $n$  progenitores (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2017), permiten estimar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), efectos recíprocos, maternos y no maternos (Griffing, 1956; Ramírez-Díaz *et al.*, 2019). La proporción relativa de la suma de cuadrados de efectos recíprocos, ACG y ACE en relación con la suma de cuadrados de cruza, indica la proporción de influencia de cada tipo de acción génica sobre la variación del germoplasma evaluado, donde la ACG es asociada a efectos aditivos, mientras que los efectos no aditivos se asocian a efectos de ACE y recíprocos, estos últimos son resultado de efectos maternos y no maternos (Hernández y De León, 2021).

La expresión de la variación en los días a floración del maíz depende principalmente de efectos de ACG y ACE (De la Cruz *et al.*, 2003; García *et al.*, 2020), también existe influencia de efectos recíprocos (Cervantes-Ortiz *et al.*, 2018) pero existe poca o nula información sobre la proporción de estos, debidos a efectos maternos y no maternos (Issa *et al.*, 2018).

Se reconoce que el nivel de diversidad genética de los progenitores influye en la expresión de los efectos recíprocos (de la Cruz *et al.*, 2003; Sánchez-Ramírez *et al.*, 2017), por lo que es necesario establecer, este tipo de parámetros de manera específica, para cada población o grupo de poblaciones a utilizar como germoplasma base de mejoramiento. Con base en lo anterior, el objetivo fue determinar la acción génica que controla la variación de la precocidad de poblaciones de maíz nativo de Tamaulipas y la relación de la precocidad con el rendimiento de grano.

## **Materiales y métodos**

### **Ubicación y manejo del experimento**

El experimento se realizó en el Campo Experimental La Posta Zootécnica ‘Ingeniero Herminio García González’, perteneciente a la Universidad Autónoma de Tamaulipas en Güémez, Tamaulipas, México; a una altitud de 193 msnm, a 23° 56’ 26” latitud norte y 99° 05’ 59” longitud oeste, durante los ciclos agrícolas OI 2019-2020 y PV 2020. Las fechas de siembra fueron el 07 de febrero y 04 de agosto, respectivamente para cada ciclo.

La preparación del terreno y el manejo del cultivo se realizaron de acuerdo con las recomendaciones para la producción de maíz en la zona norte-centro de Tamaulipas en condiciones de riego (Reyes, 2017a; Reyes, 2017b) y una densidad de población de 50 000 plantas ha<sup>-1</sup>.

### **Variables evaluadas y tratamientos experimentales**

En ambos ciclos agrícolas se evaluaron los efectos genéticos de los días a floración masculina y femenina de seis poblaciones de maíz, sus cruza directas y recíprocas, mediante un análisis dialélico con el método I de Griffing (1956). El dialélico completo se formó durante el ciclo agrícola PV 2019 mediante polinización manual de las seis poblaciones evaluadas (Cuadro 1).

Se establecieron dos estrategias de manejo de *S. frugiperda*, con y sin aplicación del insecticida benzoato de emamectina (2.12%), las aplicaciones se iniciaron a partir de la exposición completa de la cuarta hoja cada 20 días hasta llegar a floración en una dosis de 100 ml ha<sup>-1</sup>, la combinación ciclo agrícola y estrategia de manejo permitió el establecimiento de cuatro ambientes.

**Cuadro 1. Genotipos de maíz desarrollados a partir de germoplasma nativo, utilizadas para evaluar los efectos genéticos durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

Genotipo	Tipo	Colecta	Año de colecta	Municipios de origen	Coordenadas geográficas	
					N	O
PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	Línea S3	3001	2003	Padilla	23°59'00"	98°52'00"
TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Línea S3	3007	2003	Tula	22°59'00"	99°43'00"
TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	Línea S3	3012	2003	Tula	22°59'00"	99°43'00"
PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	Línea S3	3001	2003	Padilla	23°59'00"	98°52'00"
VHA	Variedad	-	2004	Centro-sur	-	-
Cam	Nativo	2011	2011	Hidalgo	24°10'00"	99°21'00"

### Diseño experimental

El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, en un arreglo de parcelas divididas para cada ciclo. En la parcela grande se ubicaron las dos estrategias de manejo de *S. frugiperda* con aplicación y sin aplicación de insecticida y en la parcela chica los cultivares de maíz. La superficie total útil de cada experimento fue de 864 m<sup>2</sup>. La unidad experimental se delimitó en una superficie de 4 m<sup>2</sup>.

Se determinaron los días a floración masculina y femenina. La primera se obtuvo al contar los días transcurridos desde la fecha de siembra, hasta el momento en que 50% de las plantas de cada unidad experimental presentaron panojas con liberación de polen en la parte media de la misma. La segunda se determinó contando los días transcurridos desde la fecha de siembra, hasta el momento en que 50% de las plantas de cada unidad experimental presentaron exposición de estigmas en la inflorescencia femenina (CIMMYT, 1995).

### Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para cada una de las variables, con el valor de la media menos la desviación estándar ( $\mu - \sigma$ ) se determinaron las cruzas con menor número de días a floración (de mayor precocidad) en comparación a la media y se hizo prueba de comparación de medias con el método de Tukey con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$  para determinar diferencias entre los ambientes de prueba.

Para la estimación de los efectos genéticos de ACG, ACE y efectos recíprocos se empleó el análisis dialélico de Griffing (1956) mediante el método I y modelo I, en el que se examinaron las líneas parentales, las cruzas F<sub>1</sub> directas y recíprocas, para lo cual se utilizó el algoritmo Diallel-SAS05 propuesto por Zhang *et al.* (2005), que permite la división de los efectos recíprocos en maternos y no maternos. Se realizó un análisis de correlación entre los días a floración masculina y femenina y el rendimiento de grano por planta, de manera conjunta y de manera individual en cada ambiente. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS, 2002).

La aportación de los efectos de ACG, ACE y recíprocos a la variación de este germoplasma se calculó con base a la proporción (%) de la suma de cuadrados de la fuente, con respecto a la suma de cuadrados total, mientras que los efectos recíprocos se partitionaron en efectos maternos y no maternos.

## Resultados y discusión

El análisis estadístico mostró significancia ( $p < 0.05$ ) entre ambientes y entre cultivares para la floración masculina y femenina; de manera contraria, no existió interacción significativa ( $p \geq 0.05$ ) para ambiente  $\times$  cultivar (Cuadro 2). Lo anterior demuestra que las condiciones ambientales diferenciales determinadas por la combinación ciclo agrícola y estrategia de manejo de *S. frugiperda*, tuvieron un efecto similar para la expresión de los días floración de cada uno de los cultivares evaluados; es decir, los cultivares presentaron una respuesta similar a los cambios ambientales determinados por la combinación de ciclo agrícola y estrategia de manejo de *S. frugiperda*.

**Cuadro 2. Análisis dialélico para floración masculina y femenina de cruza entre poblaciones de maíz nativo, durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

Fuente de variación	Floración masculina		Floración femenina	
	Suma de cuadrados	Significancia	Suma de cuadrados	Significancia
Ambiente	16381.5	<0.0001	14032.3	<0.0001
Cultivar	629.2	<0.0001	463.2	0.0002
A $\times$ C	611.5	0.8397	587	0.6473
ACG	55.8	0.154	57.9	0.0877
ACE	332.9	<0.0001	207.3	0.004
ER	240.5	0.0038	198	0.0063
ER $\times$ A	44.5	0.9692	51.7	0.891
ACG $\times$ A	42.7	0.2903	38.2	0.2721
ACE $\times$ A	35.5	0.99	58.5	0.8289
EM	137.8	0.0016	94.8	0.0073
EnM	102.7	0.1416	101.2	0.0813
EM $\times$ A	7.9	0.95	10.8	0.8749
EnM $\times$ A	36.6	0.8667	41	0.737

A= ambiente; C= cultivar; ACG= aptitud combinatoria general; ACE= aptitud combinatoria específica; ER= efectos recíprocos; EM= efectos maternos; EnM= efectos no maternos.

No se observaron efectos significativos de ACG para las variables evaluadas y tampoco existió significancia estadística para la interacción de ACG  $\times$  ambiente (Cuadro 2). De manera contraria, existieron efectos significativos de ACE, recíprocos y maternos para ambas variables evaluadas, el efecto significativo de la ACE indica que dentro del germoplasma evaluado existe variabilidad para la expresión génica de la floración masculina y femenina debida a efectos no aditivos (García *et al.*, 2020).

La significancia para efectos recíprocos mostró que el promedio de los días a floración masculina y femenina de la cruce directa (i, j) sea diferente al de la cruce inversa (j, i) para al menos un par de progenitores (i, j), por lo que, se debe considerar específicamente las poblaciones que se desempeñan como progenitor femenino o masculino (Núñez-Terrones *et al.*, 2019). Esto fue resultado de efectos maternos significativos, lo que indica que la expresión de la floración femenina y masculina en estas cruces fue controlada por genes citoplasmáticos (Mahgoub, 2011).

La expresión de la variación entre los cultivares evaluados se explica en 52.91% para floración masculina y 44.75% para floración femenina por efectos de ACE (Cuadro 2), mientras que 38.22% de la variación de la floración masculina entre cultivares y 42.74% para floración femenina fue debida a efectos recíprocos (Cuadro 2). Lo que indica que los efectos no aditivos fueron más importantes en la expresión de la variación genética, tanto para floración masculina como femenina; es decir, que la cantidad observada de días transcurridos desde la siembra a floración en las cruces se debe en mayor parte a efectos de dominancia o no aditivos y esto puede ser debido a la divergencia genética entre las poblaciones para estas variables (De la Cruz *et al.*, 2003).

Por lo anterior, el mejoramiento de la precocidad en estas poblaciones se debe realizar a través de procesos de selección recíproca recurrente o hibridación (Rodríguez *et al.*, 2020) y la formación de una cruce en particular debe considerar específicamente las líneas que fungirán como progenitor femenino o masculino (Núñez-Terrones *et al.*, 2019). Para floración masculina las cruces TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub>×VHA y Cam×VHA presentaron ACE significativa con un estimador negativo (Cuadro 3), lo que indica que presentaron menos días a floración masculina, que lo esperado de acuerdo con la ACG de las poblaciones que participaron como progenitores (Mahgoub, 2011), con un promedio de 63.4 y 63.7 días respectivamente (Cuadro 4).

**Cuadro 3. Estimadores y significancia de aptitud combinatoria específica en poblaciones de maíz para floración masculina y femenina, durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

	PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	Cam	VHA
PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>		0.0115	0.7129	-0.1828	-0.5231	-0.0926
TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-0.0556		-0.4745	-0.8287	-0.5023	-0.1551
TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	0.3264	0.0486		0.2893	-0.5926	-1.037*
PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	0.0139	-1.3055**	0.0764		0.0949	-0.3495
Cam	-0.1528	-0.3889	-0.3819	0.0972		-0.9398*
VHA	0.0208	-0.0069	-0.7916	-0.1458	-0.7708	

Floración masculina sobre la diagonal; floración femenina bajo la diagonal. \* = significativo ( $p < 0.05$ ); \*\* = altamente significativo ( $p < 0.01$ ).

De igual manera, para los días a floración femenina la cruce TGL<sub>2</sub>S<sub>3</sub>×PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> presentó ACE significativa con un estimador negativo (Cuadro 3) con un promedio de 65 días (Cuadro 4). Tomando en cuenta lo anterior y considerando la ausencia de efectos de ACG en este germoplasma (Cuadro 2), se puede considerar que este comportamiento se debe a una baja acumulación de genes aditivos para floración masculina y femenina en estas cruces, con predominancia de los progenitores con expresión de sobre dominancia para estas variables, donde se demuestra la existencia de interacción alélica (ACE) en la progenie evaluada (Gutiérrez *et al.*, 2002).

**Cuadro 4. Días a floración masculina y femenina de poblaciones de maíz y sus cruzas, durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

$\begin{matrix} \text{♂} \\ \text{♀} \\ \text{+} \end{matrix}$	PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	Cam	VHA
	Floración masculina (días)					
PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	64.7	65.2	65	63.4	63.2	66.3
TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	64	66.4	63.2	62.3*	63.6	65.4
TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	65.1	64.3	65.1	62.5*	63.5	64.2
PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	64.2	63.8	65.4	64.3	64.5	63.7
Cam	64.7	64.2	63.6	63.3	66.7	64.9
VHA	63.1	63.7	62.7*	63.9	62.4*	67.5
	Floración femenina (días)					
PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	66.2	67.7	66.8	65.4*	65.9	67.5
TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	65.5*	68.7	67.2	64*	65.8	68.2
TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	67.1	66.7	67.7	65.2*	66.3	66.9
PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	66.6	66	67.5	66.9	67.1	66
Cam	66.7	67	66.5	65.4*	68.2	67.1
VHA	66.1	65.9	65.7	66.6	65.2*	68.9

♀= progenitor materno; ♂= progenitor paterno. Arriba de la diagonal cruza directa; en la diagonal progenitores; bajo la diagonal cruza recíproca. \* = menor que  $\mu - \sigma$ ;  $\mu$  = media;  $\sigma$  = desviación estándar.

De esta manera, se observó que las cruza con ACE significativa presentaron menor número de días a floración masculina y femenina en comparación a sus progenitores (Cuadro 4). Lo cual, concuerda con lo establecido por de la Cruz *et al.* (2003), quienes señalan, que de manera general el desarrollo de las cruza es más rápido que el de sus progenitores; debido principalmente al vigor híbrido o heterosis lo que favorece tasas de desarrollo y crecimiento altas en comparación a sus progenitores. Las diferencias mostradas para la floración masculina y femenina entre las cruza evaluadas pueden ser indicativo de diversidad genética entre las poblaciones progenitoras, como lo señalaron Guillén-De la Cruz *et al.* (2009).

Para floración masculina las cruza PWL<sub>1</sub>S<sub>3</sub>×VHA, TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub>×PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> y Cam×VHA mostraron efectos recíprocos significativos y para floración femenina PWL<sub>1</sub>S<sub>3</sub>×TGL<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, TGL<sub>2</sub>S<sub>3</sub>×PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub>, TGL<sub>2</sub>S<sub>3</sub>×VHA y TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub>×PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> (Cuadro 5). Lo anterior significa que la cruza directa es diferente a la recíproca (Picón-Rico *et al.*, 2018) y se comprueba en el Cuadro 4, donde se puede observar que entre cruza directa y recíproca existen diferencias de 3.2, 3 y 2.8 días respectivamente, para floración masculina y para floración femenina de 2, 2, 2.5 y 2.3 días (Cuadro 4).

Tomando en cuenta todo lo anterior, para floración masculina y femenina sobresale VHA×Cam con 62.4 y 65.2 días respectivamente, valores menores a la media general menos la desviación estándar (Cuadro 4). Demostrando una precocidad mayor, característica favorable para su adaptación a ciclos de crecimiento corto (Luna *et al.*, 2005), como los que se presentan en la mayoría de las regiones agroecológicas de Tamaulipas (Pecina-Martínez *et al.*, 2009).

**Cuadro 5. Estimadores de efectos recíprocos para floración masculina y femenina en poblaciones de maíz nativo, durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

	PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	Cam	VHA
PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>		0.5833	-0.0416	-0.4166	-0.7083	1.625**
TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	1.0833*		-0.5833	-0.75	-0.2916	0.875
TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	-0.125	0.25		-1.4583**	-0.0416	0.75
PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	-0.5833	-1*	-1.125*		0.5833	-0.125
Cam	-0.4167	-0.5833	-0.0833	0.8333		1.25*
VHA	0.7083	1.1667*	0.625	-0.2917	0.9167	

Floración masculina sobre la diagonal; floración femenina bajo la diagonal. \* = significativo ( $p < 0.05$ ); \*\* = altamente significativo ( $p < 0.01$ ).

Se determinaron efectos maternos significativos en los progenitores PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> y VHA, el primero con un estimador positivo y el segundo con estimador negativo; tanto para floración masculina, como para femenina (Cuadro 6). Lo anterior, indica que algunas de las cruza que tuvieron como progenitor materno a VHA, presentaron un número menor de días a floración en comparación con sus cruza recíprocas; como se observó en PWL<sub>1</sub>S<sub>3</sub>×VHA y Cam×VHA con 66.3 y 64.9 días a floración masculina respectivamente, mientras que VHA×PWL<sub>1</sub>S<sub>3</sub> y VHA×Cam registraron 63.1 y 62.4 días respectivamente (Cuadro 4 y 5).

**Cuadro 6. Estimadores de efectos maternos para floración masculina y femenina en poblaciones de maíz, durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

Progenitor	Floración masculina		Floración femenina	
	Estimador	Significancia	Estimador	Significancia
PWL <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	0.1736	0.3851	0.1111	0.5505
TGL <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-0.2222	0.2665	-0.2083	0.2633
TML <sub>3</sub> S <sub>3</sub>	-0.0208	0.9169	-0.118	0.5258
PWL <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	0.5139	0.0105	0.5416	0.0039
Cam	0.2847	0.1548	0.1944	0.2964
VHA	-0.7291	0.0003	-0.5208	0.0054

De manera contraria, cuando PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> fue progenitor materno, al menos una cruza tuvo mayor número de días a floración masculina y femenina en comparación con la cruza donde esta población participó como progenitor paterno. Ejemplo de ello es PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub>×TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub> con 65.4 y 67.5 días a floración masculina y femenina respectivamente, en comparación a TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub>×PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> con 62.5 y 65.2 días (Cuadro 4). Lo anterior, demuestra que la variación de la expresión de la floración masculina y femenina es controlada por herencia citoplasmática o extranuclear (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2017), lo cual debe ser tomado en consideración al definir el orden de los progenitores en los cruzamientos a realizar (Andrio-Enríquez *et al.*, 2015).

Cuando se consideraron los cuatro ambientes evaluados, no se observó correlación significativa ( $p > 0.05$ ) entre el rendimiento de grano por planta y los días a floración masculina y femenina (Cuadro 7). Este mismo resultado, se observó en el ciclo agrícola OI, en ambas estrategias de manejo de *S. frugiperda* y en el ciclo PV solamente con aplicación de benzoato de emamectina.

**Cuadro 7. Coeficiente de correlación entre floración masculina y femenina con el rendimiento de grano, durante los ciclos OI 2019-2020 y PV 2020, Güémez, Tamaulipas, México.**

	Floración masculina		Floración femenina		Rendimiento de grano por planta
	Coeficiente de correlación	(días)	Coeficiente de correlación	(días)	(g)
Combinado <sup>II</sup>	0.04276	64.3	0.03942	66.6	92.1
Sin insecticida OI	-0.10366	70.5 a	-0.09085	72.2 a	93
Con insecticida OI	0.04212	70.4 a	-0.03563	72.4 a	95.1
Sin insecticida PV	-0.22928*	58.2 b	-0.30501**	60.9 b	82.6
Con insecticida PV	-0.13055	58 b	-0.1034	60.9 b	97.7

<sup>II</sup>= los cuatro ambientes de prueba en conjunto; OI= otoño invierno; PV= primavera verano. \* = significativo ( $p < 0.05$ ); \*\* = altamente significativo ( $p < 0.01$ ); a, b= promedios con distinta literal por columna son estadísticamente diferentes (Tukey  $\alpha = 0.05$ ).

De manera contraria, en el ciclo agrícola PV cuando no se aplicó insecticida para *S. frugiperda*, se observó una correlación significativa y positiva del rendimiento de grano por planta con floración masculina y femenina (Cuadro 7), esto indica que los cultivares más precoces presentaron un mayor rendimiento de grano por planta. Lo anterior, se debe a que el ciclo PV presenta condiciones ambientales de mayor temperatura al inicio del ciclo de crecimiento en comparación al ciclo agrícola OI (González *et al.*, 2016; Reyes, 2017a), lo que reduce, la duración del periodo de crecimiento (Ruiz-Corral *et al.*, 2002; Kalimuthu *et al.*, 2015), favoreciendo el desarrollo y crecimiento de cultivares precoces (Luna *et al.*, 2005).

En este ciclo agrícola se ha reportado una mayor incidencia de *S. frugiperda* en comparación al ciclo OI (Cantú *et al.*, 2010; Peterson *et al.*, 2017) y en este estudio cuando no se aplicó insecticida existió un mayor daño foliar promedio provocado por *S. frugiperda*, 2.96 en escala de 0 a 5, en comparación al ciclo agrícola OI sin aplicación de insecticida de 1.81 y con aplicación de insecticida en ambos ciclos sin daño foliar aparente (datos no presentados), lo que permite inferir que los cultivares de mayor precocidad tienen mejor adaptación a condiciones ambientales con presencia de plagas y temperatura alta.

## Conclusiones

La variabilidad para floración masculina y femenina entre cultivares, es explicada principalmente por aptitud combinatoria específica y efectos recíprocos; estos últimos, son resultado de efectos maternos. La precocidad observada en las cruzas TML<sub>3</sub>S<sub>3</sub>×VHA, Cam×VHA y TGL<sub>2</sub>S<sub>3</sub>×PWL<sub>6</sub>S<sub>3</sub> muestra herencia citoplasmática. En ambientes restrictivos de temperatura alta y presencia de *S. frugiperda* los cultivares precoces presentan mayor rendimiento de grano.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas por su apoyo.

## Literatura citada

- Andrío-Enríquez, E.; Cervantes-Ortiz, F.; Rivera-Reyes, J. G.; Guevara-Acevedo, L. P.; Rodríguez-Herrera, S. A.; Rodríguez-Pérez, G.; Rangel-Lucio, J. A. y Mendoza-Elos, M. 2015. Aptitud combinatoria y efectos maternos en razas de maíz mexicanas por el modelo I de Griffin. *Chilean J. Agric. Animal Sci. (exagro-Ciencia)* 31(1):5-14. <http://agrocienza.cl/images/revistas/2015/v31n1a01.pdf>.
- Burtet, M. L.; Bernardi, O.; Melo, A. M.; Pes, P. M.; Strahl, T. T. and Guedes, V. C. J. 2017. Managing fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: noctuidae), with Bt maize and insecticides in Southern Brazil. *Pest Manage. Sci.* 73(12):2569-2577. <https://doi.org/10.1002/ps.4660>.
- Cantú, A. M. A.; Reyes, M. C. A. y Rodríguez, B. L. A. 2010. Fecha de siembra: una alternativa para incrementar la producción de maíz. CIRNE-INIFAP. Folleto técnico núm. 44. 30 p.
- Castro, N. S.; Lopez, S. J. A.; Pecina, M. J. A.; Mendoza, C. M. C. y Reyes, M. C. A. 2013. Exploración de germoplasma nativo de maíz en el centro y sur de Tamaulipas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* (4):645-653. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i4.1196>.
- Cervantes-Ortiz, F.; Hernández-Esparza, J.; García-Rodríguez, J. G.; Rangel-Lucio, J. A.; Andrío-Enríquez, A.; Mendoza-Elos, M.; Rodríguez-Pérez, G. y Rodríguez-Mercado, D. 2018. Aptitud combinatoria general y específica de caracteres agronómicos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) de baja endogamia. *Chilean J. Agric. Animal Sci.* 34(1):33-42. <http://agrocienza.cl/web/wp-content/uploads/2018/06/5-Cervantes-Ortiz-et-al.-Aptitud-maiz-17.05.18.pdf>.
- CIMMYT. 1995. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Manejo de los ensayos e informe de los datos para el programa de ensayos internacionales de maíz del CIMMYT. El Batán, Estado de México. 15-17 pp. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/764/68309.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>.
- Coutiño-Estrada, B.; Gómez-Montiel, N. O.; Vázquez-Carrillo, G. y Vidal-Martínez, V. A. 2014. ‘V-560’, Nueva variedad precoz de maíz para regiones tropicales. *Rev. Fitotec. Mex.* 37(2):187-188. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/37-2/10a.pdf>.
- De la Cruz, L. E.; Gutiérrez R. E.; Palomo, G. A. y Rodríguez, H. S. 2003. Aptitud combinatoria y heterosis de líneas de maíz en la comarca lagunera. *Rev. Fitotec. Mex.* 26(4):279-284. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/26-4/9a.pdf>.
- Dos Santos, C. L. F.; Garruña, R.; Andueza-Noh, R. H.; Latournerie-Moreno, L.; Mijangos-Cortés, J. O. y Pineda-Doporto, A. 2019. Comportamiento agronómico y fisiológico de maíces nativos del sureste de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(6):1247-1258. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.908>.
- Dzib-Aguilar, L. A.; Segura-Correa, J. C.; Ortega-Paczka, R. y Latournerie-Moreno, L. 2011. Cruzas dialélicas entre poblaciones nativas de maíz de Yucatán y poblaciones mejoradas. *Trop. Subtrop. Agroecosy.* 14(1):119-127. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/660/463>.

- Ertiro, T. B.; Beyene, Y.; Das, B.; Mugo, S.; Olsen, M.; Oikeh, S.; Juma, C.; Labuschagne, M. and Prasanna, M. B. 2017. Combining ability and testcross performance of drought-tolerant maize inbred lines under stress and non-stress environments in Kenya. *Plant Breed.* 136(2):197-205. <https://doi.org/10.1111/pbr.12464>.
- Fernández, S. R.; Morales, C. L. A. y Gálvez, M. A. 2013. Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Rev. Fitotec. Mex.* 36(3-A):275-283. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/36-supl-3-A/1a.pdf>.
- Ferreira, C. I.; Silva, A. R.; Romero, A. S. C. R. J.; Peixoto, M. A.; Pereira, R. T. L.; Eduardo, T. P.; Naves, P. J. F.; Fialho, R. E. and Lopes, B. L. 2020. Multi-trait multi-environment diallel analyses for maize breeding. *Euphytica.* 216(9):1-17. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02677-9>.
- Fuentes, M.; Pantoja, A.; Sotomayor, A. y Beaver, J. 1998. Selección recurrente recíproca en maíz: tolerancia al ataque del gusano de la mazorca y el cogollero (Lepidoptera: noctuidae). *Agronomía Mesoam.* 9(1):42-52. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/24624>.
- García, M. V. M.; Chura, C. J. y Torres, J. 2020. Aptitud combinatoria y heterosis para el rendimiento, precocidad y altura en genotipos de maíz amarillo. *Rev. Fac. Agron.* 37(4):410-429. [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v37.n4.05](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v37.n4.05).
- González, M. J.; López, S. J. A.; Estrada, D. B.; Delgado, M. R.; Pecina, M. J. A.; Varela, F. E. S.; Osorio, H. E. y Rocandío, R. M. 2016. Parámetros genéticos y heterosis en líneas derivadas de poblaciones nativas de maíz tropical de Tamaulipas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7(2):387-399. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i2.352>.
- González-Martínez, J.; Rocandío-Rodríguez, M.; Contreras-Toledo, A. R.; Joaquín-Cancino, S.; Vanoye-Eligio, V.; Chacón-Hernández, J. C. y Hernández-Bautista, A. 2020. Diversidad morfológica y agronómica de maíces nativos del altiplano de Tamaulipas, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 43(4):361-370. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.361>.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system. *Austr. J. Biol. Sci.* 9(4):463-493. <https://doi.org/10.1071/BI9560463>.
- Guillen-de la Cruz, P.; Cruz-Lázaro, E.; Castañón-Najera, G.; Osorio-Osorio, R.; Brito-Manzano, N. P.; Lozano-del Río, A. y López-Noverola, U. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 10(1):101-107. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/219/15>.
- Guo, J.; Wu, S.; Zhang, F.; Huang, C.; He, K.; Babendreier, D. and Wang, Z. 2020. Prospects for microbial control of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*: a review. *Bio control.* 65(6):647-662. <https://doi.org/10.1007/s10526-020-10031-0>.
- Gutiérrez, R. E.; Palomo, G. A.; Espinoza, B. A. y Cruz, L. E. 2002. Aptitud combinatoria y heterosis para rendimiento de líneas de maíz en la comarca lagunera, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(3):271-277. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/25-3/7a.pdf>.
- Hernández, A. E. y León, C. H. 2021. Comportamiento genético para componentes de rendimiento en una población de maíz enano. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 26(esp.):131-144. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/esp26-005>.
- Issa, Z. M. M.; Nyadanu, D.; Richard, A.; Sangare, A. R.; Adejumobi, I. I. and Ibrahim, D. 2018. Inheritance and combining ability study on drought tolerance and grain yield among early maturing inbred lines of maize (*Zea mays* L.). *J. Plant Breed. Crop Sci.* 10(6):115-127. <https://doi.org/10.5897/JPBCS2017.0703>.
- Kalimuthu, S.; Jacques, E. B. and Delphine, L. 2015. Can farmers use maize earliness choice and sowing dates to cope with future water scarcity? A modelling approach applied to South-Western France. *Agric. Water Manag.* 152(1):125-134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.004>.

- Luna, F. M.; Gutiérrez, S. J. R.; Peña R. A.; Echavarría, C. F. G. y Martínez, G. J. 2005. Comportamiento de variedades precoces de maíz en la región semiárida y árida del Centro-Norte de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 28(1):39-45. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/28-1/6a.pdf>.
- Mahgoub, G. M. A. 2011. Partitioning of general and specific combining ability effects for estimating maternal and reciprocal effects. *J. Agric. Sci.* 3(2):213-222. <https://doi.org/10.5539/jas.v3n2p213>.
- Neves, C. E.; Gino, F. M.; Henrique, M. P. and Dias, E. B. M. 2020. Resistance of maize landraces from Brazil to fall armyworm (Lepidoptera: noctuidae) in the winter and summer seasons. *Bragantia.* 79(3):377-386. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200034>.
- Núñez-Terrones, E.; Mendoza-Castillo, M. C.; Delgado-Alvarado, A.; Castillo-González, F. y Sánchez-Ramírez, F. J. 2019. Análisis genético de componentes nutricionales en cruza simples de maíz de grano blanco. *Rev. Fitotec. Mex.* 42(2):163-172. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/42-2/9a.pdf>.
- Obok, E.; Ittah, M.; Udo, I.; Ojubi, E.; Ulafor, J. and Umoetok, S. 2021. Genetic variability and seasonal influence of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) damage to early vegetative growth of african maize accessions in the humid tropics of South-Eastern Nigeria. *J. Animal Plant Sci.* 31(1):143-155. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2021.1.0202>.
- Pecina, M. J. A.; Mendoza, C. M. C.; López, S. J. A.; Castillo, G. F.; Mendoza, R. M. y Ortiz, C. J. 2011. Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Rev. Fitotec. Mex.* 34(2):85-92. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/34-2/2a.pdf>.
- Pecina-Martínez, J. A.; Mendoza-Castillo, M. C.; López-Santillán, J. A.; Castillo-González, F. y Mendoza-Rodríguez, M. 2009. Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia.* 43(7):681-694. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/753/753>.
- Peterson, K. D. R.; Varella, A. C. and Higley, L. G. 2017. Tolerance: the forgotten child of plant resistance. *PeerJ* 5:e3934. <https://doi.org/10.7717/peerj.3934>.
- Picón-Rico, R.; Preciado-Ortiz, R. E.; Cervantes-Ortiz, F.; Covarrubias-Prieto, J. y Terrón-Ibarra, A. 2018. Efectos genéticos en líneas doble haploides de maíz de grano amarillo y alto contenido de aceite. *Rev. Fitotec. Mex.* 41(3):301-310. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/41-3/10a.pdf>.
- Preciado, E. R.; Erazo, M.; Quijano, J. A.; Terrón, A. y Paredes, R. 2002. Simulación del crecimiento de maíces precoces en condiciones de secano. *Agronomía Mesoam.* 13(2):123-128. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/12066>.
- Ramírez-Díaz, J. L.; Vidal-Martínez, V. A.; Alemán-Torre, I.; Ledesma-Miramontes, A.; Gómez-Montiel, N. O.; Salinas-Moreno, Y.; Bautista-Ramírez, E.; Tapia-Vargas, L. M. y Ruiz-Corral, A. 2019. Selección de líneas y cruza de maíz combinando las pruebas de mestizos y cruza dialélicas. *Rev. Fitotec. Mex.* 42(4):335-346. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/42-4/2a.pdf>.
- Reyes, M. C. A. 2017a. Maíz de riego para el norte y centro de Tamaulipas, ciclo O-I. *In: agenda técnica agrícola de Tamaulipas.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Ed. SAGARPA-COFUPRO-INIFAP. México, DF. 329-331 pp.
- Reyes, M. C. A. 2017b. Maíz de riego para el norte y centro de Tamaulipas, ciclo P-V. *In: agenda técnica agrícola de Tamaulipas.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Ed. SAGARPA-COFUPRO-INIFAP. México. 266-268 pp.

- Rodríguez, P. G.; Treviño, R. J. E.; Ojeda, Z. M. C.; Cervantes, O. F.; Ávila, P. M. A. y Gámez, V. A. J. 2020. Parámetros genéticos y aptitud combinatoria de líneas de maíz para grano. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 11(8):1867-1878. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2085>.
- Ruiz-Corral, J. A.; Flores-López, H. E.; Ramírez-Díaz, J. L. y González-Eguiarte, D. R. 2002. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia* 36(5):569-577. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/210/210>.
- Sánchez-Ramírez, F. J.; Mendoza-Castillo, M. C.; Mendoza-Rodríguez, M.; Castillo-González, F.; Cruz-Izquierdo, S.; Castro-Nava, S. y Molina-Galán, J. D. 2017. Aptitud combinatoria de líneas endogámicas para la producción de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de cruza simple en condiciones de riego. *Agrociencia*. 51(4):393-407. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1299/1299>.
- SAS. 2002. Statistical Analysis Software. SAS Online Doc. Versión 9.0 CD-ROM, SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Smith, C. E. and Clement, S. L. 2011. Molecular bases of plant resistance to arthropods. *Annual Review of Entomology*. 57(1):309-238. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120710-100642>.
- Yáñez, L. R.; Vázquez, O. A.; Arreguín, C. J. H.; Soria, R. J. y Quijano, C. J. Á. 2019. Sistema de alerta contra el gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Insecta: lepidoptera: noctuidae). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(2):405-416. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.803>.
- Yujie, L.; Jie, Z.; Tao, P. and Quansheng, G. 2021. Assessing the adaptability of maize phenology to climate change: the role of anthropogenic management practices. *J. Environ. Manage.* 293(1):112874. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112874>.
- Zhang, Y.; Kang, M. S. and Lamkey, K. R. 2005. Diallel-SAS05: a comprehensive program for Griffing's and Gardner Eberhart analyses. *Agron. J.* 97(4):1097-1106. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0260>.