



ADAPTACIÓN DE MAÍZ TUXPEÑO A VALLES ALTOS DE MÉXICO MEDIANTE SELECCIÓN MASAL

ADAPTATION OF TUXPEÑO MAIZE TO MEXICAN HIGH VALLEYS THROUGH MASS SELECTION

Norma Santiago-López¹, J. Jesús García-Zavala^{1*}, Armando Espinoza-Banda²,
Ulises Santiago-López³, Gilberto Esquivel-Esquivel⁴ y José D. Molina-Galán^{1†}

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Programa de Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Fitomejoramiento, Torreón, Coahuila, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental San Luis, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. ⁴INIFAP, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (zavala@colpos.mx)

RESUMEN

México cuenta con amplia variabilidad genética de maíz (*Zea mays* L.) que aún no ha sido aprovechada en su totalidad. Los programas de mejoramiento genético en Valles Altos han utilizado principalmente variedades de las razas locales Cónico y Chalqueño, con poco o nulo uso de materiales exóticos de otras regiones. En este estudio se evaluó el rendimiento de grano de cuatro poblaciones de maíz Tuxpeño como criterio de adaptación a valles altos. Las poblaciones se evaluaron en su versión Ciclo 1 (desadaptado) y Ciclo 7 (adaptado), junto con los híbridos H-S2, Promesa y San José como testigos. La evaluación se realizó en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicados en Texcoco, Estado de México. En ambas localidades se utilizaron diseños experimentales de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se registró la floración masculina y femenina, altura de planta y de mazorca, longitud y diámetro de mazorca, número de hileras y granos por hilera, y rendimiento de grano. Los resultados mostraron cambios significativos en el rendimiento de grano y sus componentes en el ciclo avanzado de selección C7 (5.5 a 7.9 t ha⁻¹) en comparación al C1 (1.5 a 2.2 t ha⁻¹). Los componentes de rendimiento con cambios significativos favorables fueron longitud y diámetro de mazorca, número de hileras y granos por hilera. Las poblaciones C7 superaron en rendimiento hasta en cinco veces a las del ciclo inicial; sin embargo, no igualaron el rendimiento de 11.4 t ha⁻¹ de los híbridos testigo. Las poblaciones de maíz Tuxpeño C7 pueden considerarse como variedades exóticas tropicales adaptadas a Valles Altos, pues mostraron rendimientos de 5 a 7 t ha⁻¹; además, aportan variación genética nueva que puede utilizarse en el mejoramiento del maíz local o de manera *per se* como variedades nuevas.

Palabras clave: *Zea mays*, adaptación, germoplasma exótico, raza Tuxpeño, rendimiento.

SUMMARY

Mexico has an ample, unexploited genetic variability in maize (*Zea mays* L.). Maize breeding programs in the highlands have mainly used varieties of the local races Conico and Chalqueño, with little or no use of exotic materials from other regions. In this study, grain yield of four Tuxpeño maize populations was evaluated as a criterion for adaptation to the highlands. The populations were assessed in their Cycle 1 (unadapted) and Cycle 7 (adapted) versions, along with the H-S2, Promesa, and San José hybrids as controls. The evaluation was carried out at the Experimental stations at

Colegio de Postgraduados and INIFAP in Texcoco, State of Mexico. In both locations, randomized complete blocks designs with three replications were used. Male and female flowering, plant and ear height, ear length, ear diameter, number of rows, kernels per row, and grain yield were recorded. Results showed significant changes in grain yield and its components in the advanced selection C7 (5.5 to 7.9 t ha⁻¹), compared to C1 (1.5 to 2.2 t ha⁻¹). Yield components with significant favorable changes were ear length and diameter, number of rows, and kernels per row. Cycle 7 populations outperformed up to five times those of the initial cycle; however, it did not match the yield of 11.4 t ha⁻¹ of the control hybrids. Tuxpeño C7 maize populations can be considered as exotic tropical varieties adapted to highlands, as they showed yields of 5 to 7 t ha⁻¹. Furthermore, they provide valuable novel genetic variation that could be used to improve local maize or used *per se* as new varieties.

Index words: *Zea mays*, adaptation, exotic germplasm, Tuxpeño race, yield.

INTRODUCCIÓN

México es reconocido como el cuarto país más rico en diversidad biológica a nivel mundial, y especialmente como centro de origen y diversidad del maíz (*Zea mays* L.). El maíz se siembra en todo el territorio mexicano y la producción de la mayoría de las regiones donde se cultiva depende del agua de lluvia y del trabajo de campesinos, quienes destinan la producción principalmente al autoconsumo; en esas condiciones la agricultura tradicional ha generado y continúa produciendo una gran diversidad genética del maíz (Kato *et al.*, 2009).

Debido a que el maíz es el componente básico de la dieta de los mexicanos, el rendimiento y la calidad del grano son los principales factores de atención en este cultivo por parte de mejoradores y técnicos. Los avances de la ciencia y la tecnología en el sector agrícola han promovido el uso de fertilizantes, fitohormonas y pesticidas que permiten y aumentar la producción de los cultivos; sin embargo, este

modelo de producción intensiva también ha generado preocupaciones por las consecuencias que éste tiene en los ámbitos de salud, ambiental y social (Allard, 1980; Salgado, 2015). Los avances tecnológicos, en el caso del maíz, han llevado al reemplazo de variedades nativas por mejoradas en muchas regiones, causando erosión genética.

México posee una gran diversidad de maíces, pero ésta necesita ser preservada en las diferentes regiones productoras ante impactos del cambio climático y factores adversos, también se requiere ampliar la diversidad genética de los maíces nativos de una región para obtener mejores materiales, lo cual se puede lograr mediante la introducción de germoplasma exótico (López-Morales *et al.*, 2020; Velasco-García *et al.*, 2019).

Castillo (1993) señaló que la gran diversidad de maíz disponible en México se utiliza poco en los programas de mejoramiento genético para la obtención de variedades e híbridos; asimismo, que el mejoramiento se ha limitado a usar pocas razas como Tuxpeño en el trópico húmedo, Celaya y Cónico Norteño en el Bajío, y Chalqueño y Cónico en los Valles Altos. Esta situación se atribuye primordialmente a que la mayoría de las razas presentan problemas de adaptación cuando se siembran fuera de su ambiente, y para mejorar su adaptación se requiere de un proceso efectivo de selección recurrente.

Para el aprovechamiento de la gran variación genética en el maíz se ha empleado la técnica de selección masal, la cual consiste en seleccionar las mejores plantas y mazorcas de un lote, mezclar la semilla y sembrarla para que se recombine y así originar una nueva población. Este proceso se repite sucesivamente en la población las veces que sean necesarias hasta alcanzar el objetivo definido. Un cambio metodológico importante hecho a este procedimiento es la división del lote de selección en sub-lotes; con ello, se aumenta la eficiencia de la selección (García *et al.*, 2002; Molina, 1983).

De acuerdo con Mejía y Molina (2003), la adaptabilidad es un carácter determinado genéticamente y ha sido adquirido por las plantas a través de su proceso evolutivo; su valor relativo está determinado principalmente por el grado de productividad y estabilidad de las variedades sometidas a diferentes ambientes; sus implicaciones en el mejoramiento de plantas son muy importantes, ya que tal característica permite obtener combinaciones de genes y acumulación de alelos favorables que dan como resultado incrementos en el potencial genético de una especie. En este sentido, Hallauer *et al.* (2010) señalaron que el rendimiento es una medida de la capacidad reproductiva y productiva, por lo que el grado de adaptación del maíz exótico está relacionado con su capacidad de producir una

descendencia robusta en la zona donde éste se introduce (Gómez-Espejo *et al.*, 2015).

Desde el punto de vista agronómico, Lin y Binns (1994) definieron el término adaptabilidad como la capacidad de rendimiento de un cultivo, donde una variedad se considera bien adaptada a una región si su rendimiento es alto en relación con el resto de los materiales locales; en contraste, la estabilidad se refiere a la variabilidad del rendimiento a través de ambientes, por lo que una variedad se considera estable si su rendimiento varía poco año con año o de región en región.

La siembra inicial del maíz exótico en una región nueva generalmente presenta inadaptación, susceptibilidad a enfermedades, modificación del ciclo vegetativo y bajo rendimiento (Gordón-Mendoza *et al.*, 2006; Navas y Cervantes, 1991), por lo cual, la mejor opción para aumentar la frecuencia de los genes favorables del material exótico en una nueva región es aplicar una ligera presión de selección a largo plazo (Gómez-Espejo *et al.*, 2015).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de cuatro poblaciones de maíz tropical Tuxpeño, cada una en sus versiones de Ciclo 1 (desadaptado) y Ciclo 7 (adaptado), seleccionadas para adaptación a valles altos. La hipótesis planteada fue que las poblaciones adaptadas superan en rendimiento a las poblaciones originales de las cuales se derivaron, y que igualan, mejoran, o superan el rendimiento de híbridos comerciales locales de valles altos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

El material utilizado en este trabajo comprendió cuatro compuestos de maíz tropical Tuxpeño denominados Población 1 (Compuesto Tuxpeño Crema 1 Planta Baja), Población 2 (Mezcla Tropical Blanca), Población 3 (La Posta) y Población 4 (Compuesto de variedades sobresalientes de Tuxpeño, CVST), provenientes en su mayoría de germoplasma de la vertiente del Golfo de México. Estas poblaciones fueron seleccionadas en Montecillo, Texcoco, Estado de México durante siete ciclos de selección masal, se tomaron plantas sanas y de porte bajo, con buen rendimiento y buen aspecto de planta y mazorca. Cada población fue representada por su compuesto de Ciclo 1 de selección masal (C1, desadaptado) y Ciclo 7 (C7, adaptado). Se incluyeron los híbridos comerciales locales H-S2, Promesa y San José como testigos.

Sitios de evaluación y diseño experimental

La evaluación de los materiales se realizó en los

campos experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo y CEVAMEX del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicados en Texcoco, Estado de México. La siembra de los materiales en las dos localidades se hizo en la segunda quincena de mayo de 2013 bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió de 52 plantas en una superficie de 4.8 m², sembradas de forma manual a razón de dos semillas por mata a una separación de 0.5 m en parcelas de dos surcos de 6 m de longitud, con separación de 0.8 m entre surcos, lo que equivale a una densidad de población de 60,000 plantas por hectárea

VARIABLES EVALUADAS

Se registraron las variables días a floración masculina (FM) cuando el 50 % de las plantas de la parcela liberaron polen y días a floración femenina (FF) cuando el 50 % de las plantas en la parcela expusieron los estigmas de alrededor de 3 cm de longitud. En la etapa de grano estado masoso se midió la altura de planta (AP) en cm de cinco plantas de cada unidad experimental, desde la base del tallo hasta el nudo de inserción de la espiga; también se midió la altura de mazorca (AM) en cm desde la base del tallo hasta el nudo de inserción de la mazorca superior.

En etapa de grano lechoso-masoso se midieron en 10 plantas tomadas al azar en cada parcela las variables número de hojas (NH) desde la base del tallo hasta la hoja bandera, longitud total de la espiga (LE) en cm, longitud de la espiga central (LEC) en cm, número de ramificaciones de la espiga (NR), pilosidad (PIL) en escala visual del 1 a 5 donde 1 expresa muy poca pilosidad y 5 mucha pilosidad, color de tallo (CL) en escala visual del 1 a 5 donde 1 corresponde a un color verde limón y 5 a un color morado de la planta, y diámetro de tallo (DT) en mm. El registro de datos se realizó de acuerdo con la guía de descriptores para el cultivo de maíz del SNICS (2004) y CIMMYT (1990).

Los datos de longitud y diámetro de mazorca, en cm, así como número de hileras y número de granos por hilera se tomaron de cinco mazorcas seleccionadas al azar en cada parcela. También se registró el número de mazorcas (NM) y el peso de mazorca en kg y se ajustó a humedad constante del 14 %. Para la estimación del rendimiento de grano se usó la fórmula recomendada por Espinosa *et al.* (2013):

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

donde: PC: peso de campo de la totalidad de las mazorcas cosechadas por parcela (kg), % MS: porcentaje de materia seca de la muestra de grano de cinco mazorcas recién cosechadas, % G: porcentaje de grano en la mazorca, FC:

factor de conversión para obtener el rendimiento por ha (10,000 m²/parcela útil en m²), 8600: valor constante que permite estimar el rendimiento con una humedad al 14 %.

Se realizó análisis de varianza combinado de los datos de cada variable usando el paquete estadístico SAS® versión 8 (SAS Institute, 2002). La fuente de variación genotipos se partió en materiales de C1, C7, testigos y grupo de materiales. La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para cada una de las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento, fenología, porte de planta y características de mazorca

El análisis de varianza detectó diferencias significativas y altamente significativas entre ambientes para las variables evaluadas (Cuadro 1), excepto para rendimiento (REN) y número de hileras por mazorca (NH), lo que indica que el rendimiento y NH promedio de las poblaciones no fueron afectadas significativamente por el ambiente; en cambio, sí hubo diferencias significativas de los genotipos entre ambiente para las variables días a floración masculina y femenina (FM, FF), altura de planta y de mazorca (AP, AM). También se observaron diferencias significativas en los componentes del rendimiento longitud de mazorca (LM), diámetro de mazorca (DM) y granos por hilera (GH). Entre genotipos hubo diferencias altamente significativas para todas las variables, puesto que se agruparon tanto poblaciones del C1, del C7 y testigos. Esta diferencia entre genotipos está en concordancia con la interacción genotipo por ambiente, reportado por Torres *et al.* (2011) y Lozano-Ramírez *et al.* (2015); estos últimos autores señalaron que existen buenos materiales para algunos ambientes, pero que no responden bien en otros.

En el Cuadro 1 también se muestra que el comportamiento promedio individual de las variedades que tuvieron significancia fue diferente a través de los ambientes de prueba. Estas diferencias entre genotipos y su comportamiento se explican en virtud de la diferencia genética intrínseca del material utilizado y de la interacción de los materiales con el ambiente (Alejos *et al.*, 2006; Torres *et al.*, 2011).

En la partición de la fuente de variación genotipos hubo significancia estadística ($P \leq 0.05$) para rendimiento entre los genotipos del C1 (desadaptados), entre genotipos del C7 (adaptados) y entre testigos (TES), así como entre grupos de materiales (C1, C7, TES). Además del REN, la AP y AM también resultaron significativas entre los genotipos del ciclo C1, mientras que la LM y el DM mostraron

significancia entre genotipos de C7. Estos resultados indican que hubo diferencias en rendimiento en las variables antes señaladas entre grupos y dentro de cada grupo de genotipos. Se resalta que los materiales del C1 presentaron variaciones en rendimiento, altura de planta y mazorca, lo cual es predecible debido a que es característico que los individuos de poblaciones inicialmente desadaptadas presenten grandes variaciones en altura de planta y mazorca (Pérez-Colmenárez *et al.*, 2000). Los coeficientes de variación resultaron de magnitud aceptable (menores de 20 %), lo que significa que se tuvo control adecuado de la variación experimental y que los datos obtenidos son confiables (Cuadro 1).

Con relación al rendimiento de los genotipos de maíz Tuxpeño por ciclo de selección, los materiales del C7 (adaptado) tuvieron rendimientos más altos (5.5 a 7.9 t ha⁻¹) que los compuestos del C1 (1.5 a 2.2 t ha⁻¹) en todas las poblaciones (Cuadro 2). De acuerdo con estos resultados, las poblaciones de C7 pueden considerarse con cierto nivel de adaptación a las condiciones de Valles Altos, pues presentaron rendimientos que superan el promedio de rendimiento de los estados que conforman los Valles Altos de 2.78 t ha⁻¹ (SIAP, 2019) y rindieron hasta cinco veces más que los compuestos de ciclos originales. No obstante, a pesar del buen rendimiento obtenido en los compuestos de C7, éstos no igualaron o superaron el rendimiento de los híbridos comerciales testigo (9.8 y 12.1 t ha⁻¹), por lo cual se cumple parcialmente la hipótesis planteada en el sentido que las poblaciones adaptadas superan en rendimiento a las poblaciones originales de las

cuales se derivaron, y que igualan, mejoran, o superan el rendimiento de híbridos comerciales locales.

Con respecto a los componentes del rendimiento LM, DM, NH y GH, éstos presentaron cambios significativos tras aumentar su valor de C1 a C7, lo que se atribuye al proceso de adaptación. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Pérez *et al.* (2002), Pérez-Colmenárez *et al.* (2000) y López-Morales *et al.* (2020) en el sentido de que se deben seleccionar las plantas y mazorcas de mejor aspecto, pues este es un criterio importante de selección por incidir directa y positivamente sobre el rendimiento y la adaptación de los genotipos.

Las poblaciones de C1 y C7 de Tuxpeño presentaron portes de planta más bajos (menores a 200 cm) en comparación con los híbridos testigo, que tuvieron valores promedio de AM y AP más altos, de 133 a 271 cm, respectivamente, pues previamente fueron seleccionadas para porte bajo de planta; sin embargo, resultaron más tardías para FF (95 a 103 d) debido a que el maíz Tuxpeño es tardío en su zona de origen; no obstante, las poblaciones seleccionadas C7 se consideran de ciclo vegetativo intermedio, con alturas de planta y de mazorca aceptables, de acuerdo con Pérez-Colmenárez *et al.* (2007), aun cuando estas dos características hayan aumentado ligeramente con la selección para adaptación a Valles Altos.

Los resultados obtenidos son importantes porque indican que mediante selección masal visual recurrente es

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza y coeficientes de variación del rendimiento y variables agronómicas de ocho poblaciones de maíz Tuxpeño original y adaptado por selección a Valles Altos de México, y de tres testigos comerciales.

| FV | GL | REN | FM | FF | AP | AM | LM | DM | NH | GH |
|---------|----|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|---------|
| AMB (A) | 1 | 2.98 | 4049.8** | 3971.9** | 1901.7* | 4574** | 6303.4** | 435.3** | 0.74 | 32.1* |
| REP/A | 4 | 0.76 | 19.88* | 22.8** | 1101.9* | 620.2** | 272.35 | 13.9 | 0.24 | 3.83 |
| GEN (G) | 10 | 100.1** | 178.5** | 186.1** | 7176.80** | 2183.04** | 5508.58** | 605.9** | 10.4** | 38.7** |
| C1 | 3 | 0.61* | 6.78 | 4.15 | 3544.7** | 1233.4** | 364.6 | 69.95 | 2.72 | 20.72 |
| C7 | 3 | 7.74* | 21 | 19.28 | 507.51 | 232.73 | 397.2* | 13.1* | 0.44 | 8.44 |
| TES | 2 | 11.4* | 48.22 | 63.39 | 279.69 | 343.61 | 693.4** | 5.17 | 0.72 | 12.7** |
| GRP | 2 | 476.6** | 802.6* | 831.9* | 29526* | 8372.4* | 25706.8* | 2899.7** | 46.4** | 136.9** |
| G × A | 10 | 5.01** | 8.73 | 10.61 | 501.13* | 479.62* | 2873.83** | 211.5** | 1.11 | 35.7** |
| Error | 68 | 836,818 | 6.03 | 5.9 | 246.37 | 149.19 | 353.41 | 38.32 | 0.59 | 3.82 |
| CV (%) | | 15.1 | 2.6 | 2.5 | 7.2 | 11.5 | 15.7 | 15.2 | 5.1 | 6.5 |

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, AMB: ambientes, REP/A: repeticiones dentro de ambientes, GEN: genotipos, C1: compuesto de Tuxpeño de Ciclo 1, C7: compuesto de Tuxpeño de Ciclo 7, TES: testigos, GRP: grupos de genotipos, G × A: interacción genotipo por ambiente, CV: coeficiente de variación, REN: rendimiento de grano, FM: floración masculina, FF: floración femenina, AP: altura de planta, AM: altura de mazorca, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, NH: número de hileras, GH: granos por hilera, * y **: significancia al 0.05 y al 0.01 de probabilidad, respectivamente.

posible adaptar y aumentar el rendimiento de poblaciones de maíz Tuxpeño originarias del trópico húmedo a los Valles Altos de México (2200 msnm), ya que la zona principal óptima de cultivo del maíz Tuxpeño es desde el nivel del mar hasta los 500 m de altitud (Wellhausen *et al.*, 1951; Wen, 2012).

Características de la espiga y del tallo

Con respecto a las variables morfológicas, se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para las variables NM, LE y LEC entre ambientes, mientras que entre genotipos hubo significancia para todas las variables medidas, excepto NM (Cuadro 3). En la partición de la fuente de variación de genotipos no se detectó significancia para ninguna variable entre las poblaciones C1, C7 ni entre los testigos (TES), pero sí la hubo entre grupos de materiales C1, C7 y TES para la mayoría de caracteres, excepto para NH y LE. La interacción genotipo por ambiente resultó significativa para las variables NM, NR, CL, DT. Este comportamiento podría atribuirse a que la variedad original de maíz Tuxpeño experimentó cambios favorables en su base genética por el proceso de selección masal que se le practicó durante siete ciclos en la localidad de Montecillo, Texcoco, región de los Valles Altos de México (Pérez-Colmenárez *et al.*, 2000).

La comparación de medias de variables morfológicas

(Cuadro 4) indica que con el proceso selección para adaptación del maíz Tuxpeño no hubo cambios significativos entre poblaciones del ciclo adaptado y ciclo original para el NM y NH. En relación con la LEC se produjeron decrementos significativos para las poblaciones adaptadas (C7) y resultó inferior comparada con los híbridos comerciales. Los cambios en la expresión de estos caracteres fueron más evidentes en la Población # con diferencia de 10 y 3 cm en las poblaciones 1 y 4. La LEC se redujo 5 cm en las poblaciones adaptadas 1, 3 y 4. No hubo cambios en el NR, PIL, CL y DT, por lo que las poblaciones de los ciclos avanzados alcanzaron a igualar y aun a superar a los híbridos comerciales. Por último, el DT mostró igualdad entre las poblaciones originales e híbridos comerciales, con excepción de P1C1 que presentó tallos más gruesos.

Estos resultados muestran que hubo algunos cambios en las características físico-morfológicas de las poblaciones de maíz Tuxpeño adaptado, lo que fue reiterativo en la P3C7, lo que confirma la efectividad del método de selección para incrementar la adaptación de variedades exóticas a regiones específicas, al generarse cambios adaptativos en las poblaciones exóticas sometidas a selección fuera de su lugar de origen (Pérez-Colmenárez *et al.*, 2000), lo que las habilita como una fuente de características que se pueden utilizar sistemáticamente en el mejoramiento genético regional (Linares-Holguín *et al.*, 2019).

Cuadro 2. Rendimiento medio y variables agronómicas de ocho poblaciones de maíz Tuxpeño, original y adaptado a Valles Altos de México y tres testigos.

| GEN | REN | FM | FF | AP | AM | LM | DM | NH | GH |
|------------|-----------------------|---------|---------|----------|-----------|----------|--------|---------|-----------|
| | (t ha ⁻¹) | (d) | | | (cm) | | | | |
| P1C1 | 1.5 e | 100.3 a | 101.8 a | 167.7 c | 75.8 d | 8.2 d | 3.0 c | 13.8 cd | 26.3 de |
| P1C7 | 7.9 c | 99.0 a | 101.3 a | 204.1 b | 99.4 cd | 14.2 ab | 4.5 a | 14.3 c | 30.0 abcd |
| P2C1 | 1.9 e | 98.5 a | 100.8 a | 171.7 c | 78.1 d | 7.7 d | 2.8 c | 13.3 cd | 26.8 cde |
| P2C7 | 5.7 d | 96.5 a | 99.0 a | 205.4 b | 99.3 cd | 12.7 abc | 4.6 a | 14.0 cd | 28.3 bcd |
| P3C1 | 2.2 e | 98.3 a | 102.5 a | 219.6 b | 104.5 c | 8.2 d | 2.4 c | 12.5 d | 24.0 e |
| P3C7 | 5.6 d | 101 a | 103.3 a | 223.7 b | 109.5 bc | 13.4 ab | 4.3 a | 14.3 c | 30.0 abcd |
| P4C1 | 1.6 e | 100.3 a | 102.6 a | 198.1 bc | 98.2 cd | 9.5 cd | 3.1 bc | 14.0 cd | 28.5 bcd |
| P4C7 | 5.5 d | 98.1 a | 100.6 a | 215.4 b | 110.7 abc | 12.4 bc | 4.3 ab | 14.6 bc | 27.6 bcde |
| H-S2 | 12.3 a | 91.1 b | 94.0 b | 271.0 a | 134.5 a | 15.1 ab | 5.1 a | 16.6 a | 33.1 a |
| Promesa | 9.8 b | 85.8 c | 88.0 c | 264.4 a | 120.7 abc | 14.0 ab | 5.0 a | 16.5 a | 30.3 abc |
| San José | 12.1 a | 86.8 bc | 88.8 c | 257.3 a | 133.0 ab | 16.2 a | 5.1 a | 16.0 ab | 31.1 ab |
| DSH (0.05) | 1.8 | 4.8 | 4.7 | 30.9 | 24 | 3.7 | 1.2 | 1.5 | 3.9 |

Medias con letra igual en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). REN: rendimiento de grano, FM: floración masculina, FF: floración femenina, AP: altura de planta, AM: altura de mazorca, LM: longitud de mazorca, DM: diámetro de mazorca, NH: número de hileras, GH: granos por hilera, DSH: diferencia significativa honesta.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza y coeficientes de variación de ocho características morfológicas de cuatro poblaciones de maíz Tuxpeño desadaptado y cuatro adaptadas por selección masal y de tres testigos comerciales.

| FV | GL | NM | NH | LE | LCE | NR | PIL | CL | DT |
|---------|----|-------|-------|--------|----------|--------|--------|--------|---------|
| AMB (A) | 1 | 2.6* | 3.98 | 20.32* | 4.58** | 10.28 | 2.4 | 1.2 | 14.6 |
| REP/AMB | 4 | 0.19 | 2.81 | 16.5 | 3.23 | 4.7 | 2.23 | 0.21 | 3.72 |
| GEN (G) | 10 | 0.38 | 4.47* | 52.7** | 51.6** | 25.5** | 4.34** | 3.37** | 112.62* |
| C1 | 3 | 0.66 | 5.86 | 125.8 | 55.62 | 33.52 | 0.52 | 0.11 | 266.5 |
| C7 | 3 | 0.10 | 4.00 | 11.27 | 9.9 | 8.55 | 1.4 | 1.57 | 5.82 |
| TES | 2 | 0.11 | 2.10 | 19.8 | 7.4 | 16.04 | 5.5 | 4.4 | 3.05 |
| GRP | 2 | 0.82* | 5.52 | 35.94 | 151.62** | 52.53* | 5.3** | 4.4** | 163.24* |
| G × A | 10 | 0.18* | 2.47 | 30.6 | 28.7 | 12.4* | 2.2 | 1.62* | 11.8* |
| Error | 68 | 0.12 | 1.93 | 6.25 | 3.84 | 2.45 | 0.33 | 0.65 | 33.13 |
| CV (%) | | 20.7 | 10.3 | 6.51 | 7.79 | 11.19 | 23.01 | 28.4 | 19.24 |

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, AMB: ambientes, REP: repeticiones, GEN: genotipos, C1: compuestos de Tuxpeño de Ciclo 1; C7: compuestos de Tuxpeño de Ciclo 7, TES: testigos, GRP: grupos de genotipos, CV: coeficiente de variación, NM: número de mazorcas, NH: número de hojas, LE: longitud total de la espiga, LCE: longitud de la espiga central, NR: número de ramificaciones, PIL: pilosidad, CL: color de tallo, DT: diámetro de tallo, * y **: significancia al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente.

Cuadro 4. Comparación de medias de las características morfológicas de cuatro poblaciones de maíz Tuxpeño, C1 (desadaptado) y su ciclo avanzado C7 (adaptado).

| GEN | NM | NH | LE | LCE | NR | PIL | CL | DT |
|------------|-----|-------|---------|-----------|------------|-------------------|-----------|--------|
| | | | (cm) | | | Escala visual 1-5 | | (mm) |
| P1C1 | 2 a | 12 ab | 35.1 b | 23.9 bcde | 11.3 ef | 1.5 cd | 1 c | 33.5 a |
| P1C7 | 2 a | 12 ab | 33.7 b | 19.2 e | 13.4 cdedf | 4.2 a | 3.8 abbbb | 28.9 b |
| P2C1 | 2 a | 14 ab | 34.0 b | 20.9 e | 13.5 bcdef | 1.8 cd | 2 b | 31.0 b |
| P2C7 | 2 a | 14 ab | 34.5 b | 22.6 cde | 14.7 abcde | 3.8 b | 4.3 a | 30.2 b |
| P3C1 | 2 a | 14 ab | 48 a | 31 a | 19 a | 2 cd | 1 c | 28.2 b |
| P3C7 | 2 a | 15 a | 36.1 b | 22.1 de | 15.2 abcde | 3.5 b | 4 a | 29.3 b |
| P4C1 | 2 a | 14 ab | 41.7 ab | 23.6 bcde | 16.4 abcd | 1.4 cde | 1.4 bc | 28.1 b |
| P4C7 | 2 a | 14 ab | 38.4 b | 23.5 bcde | 18.0 abc | 4.6 a | 3.9 a | 28.0 b |
| H-S2 | 2 a | 12 ab | 39.4 b | 30.7 a | 10.4 ef | 2.4 c | 2.1 bc | 26.1 b |
| Promesa | 2 a | 13 ab | 36.4 b | 27.8 abcd | 9.4 f | 3.1 bc | 2 bccc | 24.8 b |
| San José | 2a | 13 ab | 41.5 ab | 30.3 a | 13.8 bcdef | 2.8 bc | 2.7 bc | 26.8 b |
| Media | 2 | 13 | 38 | 25 | 14 | 3 | 2 | 29 |
| DSH (0.05) | 1.2 | 3.3 | 8.1 | 5.7 | 5.1 | 2 | 1.3 | 13.8 |

Medias con letras iguales dentro de columnas son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). NM: número de mazorcas, NH: número de hojas, LE: longitud total de la espiga, LCE: longitud de la espiga central, NR: número de ramificaciones, PIL: pilosidad, CL: color de tallo, DT: diámetro de tallo, DHS: diferencia honesta significativa.

CONCLUSIONES

Las poblaciones de maíz Tuxpeño de ciclos avanzados de selección para adaptación a Valles Altos aumentaron su rendimiento con respecto a las poblaciones originales; a pesar de ello, éstas no superaron ni igualaron el rendimiento de los testigos locales, pero constituyen variedades de ciclo intermedio adaptadas a Valles Altos con avances de hasta cinco veces el rendimiento de los compuestos de los ciclos originales. Los componentes del rendimiento que aumentaron su valor por el proceso de selección y contribuyeron al rendimiento de los compuestos adaptados fueron longitud de mazorca, diámetro de mazorca, número de hileras, y número de granos por hilera. Las variables floración femenina y masculina, como una característica de adaptación, no modificaron sustancialmente sus valores durante el proceso de selección. Las poblaciones de maíz Tuxpeño de ciclo avanzado expresaron rendimiento aceptable, características morfológicas deseables en la planta como número de ramificaciones en la espiga, pilosidad y color de tallo. Se aporta evidencia sobre la factibilidad de utilizar germoplasma exótico tropical adaptado como fuente de nueva variación para maíces de los Valles Altos de México.

BIBLIOGRAFÍA

- Alejos G., P. Monasterio y R. Rea (2006) Análisis de la interacción genotipo - ambiente para rendimiento de maíz en la región maicera del estado Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical* 56:369-384.
- Allard R. W. (1980) Principios de la Mejora Genética de las Plantas. J. L. Montoya (trad.). Cuarta edición. Omega. Barcelona, España. 498 p.
- Castillo G. F. (1993) La variabilidad genética y el mejoramiento de los cultivos. *Ciencia* 44:69-79.
- CIMMYT, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (1990) The Accession Editor for Maize Germoplasm Documentation and Networking. CIMMYT. México, D. F. 42 p.
- Espinosa C. A., M. Tadeo R., N. Gómez M., M. Sierra M., J. Virgen V., A. Palafox C. ... y R. Valdivia B. (2010) V-54 A, nueva variedad de maíz de grano amarillo para siembras de temporal retrasado en Valles altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:677-680.
- Espinosa-Calderón A., M. Tadeo-Robledo, A. Turrent-Fernández, M. Sierra-Macias, N. Gómez-Montiel y B. Zamudio-González (2013) Rendimiento de variedades precoces de maíz grano amarillo para valles altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 24:93-99, <https://doi.org/10.15517/am.v24i1.9644>
- García Z. J., J. López R., J. Molina G. y T. Cervantes S. (2002) Selección masal visual estratificada y de familias de medios hermanos en una crucea intervartietal F₂ de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:387-391.
- Gómez-Espejo A. L., J. D. Molina-Galán, J. J. García-Zavala, M. C. Mendoza-Castillo y A. de-la-Rosa-Loera (2015) Poblaciones exóticas originales y adaptadas de maíz. I: variedades locales de clima templado x variedades tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:57-66, <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.1.57>
- Gordón-Mendoza R., I. Camargo-Buitrago, J. Franco-Barrera y A. González-Saavedra (2006) Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17:189-199.
- Hallauer A. R., M. J. Carena and J. B. Miranda Filho (2010) Quantitative Genetics in Maize Breeding. Springer. New York, USA. 663 p.
- Kato Y. T. A., C. Mapes S., L. M. Mera O., J. A. Serratos H., y R. A. Bye B. (2009) Origen y Diversificación del Maíz: Una Revisión Analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D. F. 116 p.
- Lin C. S. and M. R. Binns (1994) Concepts and methods for analyzing regional trial data for cultivar and location selection. *Plant Breeding Reviews* 12:271-297, <https://doi.org/10.1002/9780470650493.ch10>
- Linares-Holguín O. O., M. Rocandío-Rodríguez, A. Santacruz-Varela, J. Á. López-Valenzuela, L. Córdova-Téllez, S. Parra-Terraza, A. Leal-Sandoval, I. E. Maldonado-Mendoza y P. Sánchez-Peña (2019) Caracterización fenotípica y agronómica de maíces (*Zea mays* ssp. *mays* L.) nativos de Sinaloa, México. *Interciencia* 44:421-428.
- López-Morales F., J. J. García-Zavala, T. Corona-Torres, S. Cruz-Izquierdo, G. López-Romero, D. Reyes-López, ... y J. D. Molina-Galán (2020) Comparación del rendimiento y cambios morfológicos en maíz Tuxpeño V-520C adaptado a valles altos en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43:133-141, <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.133>
- Lozano-Ramírez A., A. Santacruz-Varela, F. San-Vicente-García, J. Crossa, J. Burgueño y J. D. Molina-Galán (2015) Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:337-347. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.4.337>
- Mejía C. J. A. y J. D. Molina G. (2003) Cambios de estabilidad en el rendimiento de variedades tropicales de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26:89-94.
- Molina G. J. D. (1983) Selección Masal Visual Estratificada en Maíz. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 35 p.
- Navas A. A. A. y T. Cervantes S. (1991) Selección para rendimiento y adaptación a Valles Altos en cruces intervartietales tropicales de maíz de México. *Agrociencia* 2:97-113.
- Pérez C. A., J. D. Molina G. y A. Martínez G. (2002) Adaptación a clima templado de razas tropicales y subtropicales de maíz de México por selección masal visual, rendimiento, altura de planta y precocidad. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:435-441.
- Pérez-Colmenárez A. A., J. D. Molina-Galán y A. Martínez-Garza (2000) Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34:533-542.
- Pérez-Colmenárez A., J. Molina-Galán, Á. Martínez-Garza, P. García-M. y D. Reyes-López (2007) Selección masal para la adaptación a clima templado de razas tropicales y sub-tropicales de maíz de México. *Bioagro* 19:133-141.
- Salgado S. R. (2015) Agricultura sustentable y sus posibilidades en relación con consumidores urbanos. *Estudios Sociales* 23:113-140.
- SAS Institute (2002) SAS/STAT User's Guide. Version 8. Sixth edition. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. 112 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019) Avance de siembras y cosechas. Resumen nacional por estado. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do (Julio 2020).
- SNICS, Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2004) Guía técnica para la descripción varietal de maíz (*Zea mays* L.). Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D. F. 22 p.
- Torres F. J. L., E. J. Morales R., A. González H., A. Laguna C. y H. Córdova O. (2011) Respuesta de híbridos trilineales y probadores de maíz en Valles Altos del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:829-844, <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i6.1564>
- Velasco-García A. M., J. J. García-Zavala, J. Sahagún-Castellanos, R. Lobato-Ortiz, C. Sánchez-Abarca e I. M. Marín-Montes (2019) Rendimiento, componentes de rendimiento y heterosis de germoplasma de maíz adaptado a Valles Altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:367-374, <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.367-374>
- Wellhausen E. J., L. M. Roberts y E. Hernández X. (1951) Razas de Maíz en México. Su Origen, Características y Distribución. Secretaría de Agricultura y Ganadería de México. México, D. F. 237 p.
- Wen W., J. Franco, V. H. Chávez-Tovar, J. Yan and S. Taba (2012) Genetic characterization of a core set of a tropical maize race Tuxpeño for further use in maize improvement. *PLoS ONE* 7:e32626, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032626>