

Evaluación de mestizos y uso de técnicas multivariadas para identificar líneas sobresalientes de maíz

Francisco Javier Sánchez-Ramírez¹
Ma. del Carmen Mendoza-Castillo^{2§}
Carmen Gabriela Mendoza-Mendoza²

¹Departamento de Fitomejoramiento-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. (javier.sanchez@uaaan.edu.mx). ²Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Campus Montecillo-Colegio de Postgraduados. Carretera México- Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. (mendoza.carmen@colpos.mx).

§Autor para correspondencia: camen@colpos.mx.

Resumen

Es común que en programas de fitomejoramiento basados en esquemas de hibridación se inicie con centenas de líneas endogámicas; lo anterior, hace indispensable su discriminación para continuar con las de atributos deseables. El presente trabajo se realizó en 2017 en el Colegio de Postgraduados y en el Instituto Tecnológico Superior de Occidente del Estado de Hidalgo, para elegir mestizos sobresalientes, los cuales se formaron con 34 líneas (S₃-S₄) desarrolladas para la producción de grano en condiciones de riego limitado o de temporal, éstos fueron identificados por selección fenotípica integral, análisis de componentes principales y análisis de dispersión gráfico. Se aplicaron criterios de alto rendimiento y características agronómicas-morfológicas de interés para la producción de grano y para su mejoramiento. El análisis de componentes principales y el análisis de dispersión gráfico contribuyeron a una caracterización confiable y fácil visualización gráfica de la expresión fenotípica de los mestizos. Las líneas sobresalientes fueron las que dieron origen a los mestizos identificados como ^1, ^4, ^5, ^8, ^10, ^11, ^14, ^16, ^19 y ^27, mismos que rindieron entre 8.5 y 6.2 t ha⁻¹. Asimismo, tuvieron valores elevados de peso de mazorca, diámetro y longitud de mazorca, y peso de grano; el mestizo ^27 también sobresalió por su prolificidad.

Palabras clave: análisis de componentes principales, análisis de dispersión gráfico, línea x probador, Valles Altos del Centro de México.

Recibido: enero de 2020

Aceptado: marzo de 2020

El fitomejoramiento realizado con metodologías convencionales (selección o hibridación), aprovecha los efectos genéticos aditivos o de dominancia y epistasis (Hallauer *et al.*, 2010). Por lo general la selección se aplica primero, ya que mejora las bases genéticas de las poblaciones que darán origen a las líneas endogámicas. Los programas de mejoramiento por hibridación comúnmente se inician con amplio número de líneas endogámicas (Jugenheimer, 1981), lo que hace indispensable su discriminación para identificar a las mejores por su aptitud combinatoria y características agronómicas sobresalientes.

Para determinar el potencial de una línea se analiza el comportamiento de sus cruza, pero esto es impráctico cuando el número de cruzamientos posibles es muy grande. Ante esta problemática, Jenkins (1929) propuso cruzar líneas con un probador común, metodología denominada 'prueba de mestizos' o 'línea x probador', la cual es eficiente para la evaluación temprana de líneas ya que permite determinar cuál es su aptitud combinatoria.

Aunque regularmente se busca incrementar el rendimiento de grano, en el proceso de mejora también se evalúan otras variables para elegir fenotipos útiles, pero se ha observado que algunas de éstas tienen variación limitada, lo que dificulta la selección de los fenotipos superiores con base en estas características. Iezzoni y Pritts (1991); Yan y Frégeau-Reid (2008); Maji y Shaibu (2012) sugieren que para la óptima selección de fenotipos se puede utilizar el análisis de componentes principales y el análisis de dispersión gráfico como herramientas para identificar las variables de mayor peso, los genotipos y la interrelación entre éstos que mejor expliquen la variación estudiada.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue discriminar líneas de un programa de mejoramiento genético en maíz e identificar las sobresalientes, a través de la prueba de mestizos, el análisis de componentes principales y el análisis de dispersión gráfico, así como la expresión agronómica-morfológica de los mestizos formados con 34 líneas endogámicas (S₃-S₄) desarrolladas para la producción de grano en riego limitado o temporal.

Material vegetal

Las 34 líneas S₃-S₄ con las que se formaron los mestizos se obtuvieron de 20 variedades de polinización libre (VPL), las cuales se derivaron por selección recurrente de poblaciones nativas de maíz con mazorcas tipo Cónico de los Valles Altos Centrales de México (> 2 200 msnm) y áreas de transición del Valle del Mezquital (1 700 a 2 100 msnm), en el estado de Hidalgo. Las VPL se caracterizaron por ser aptas para la producción de grano en condiciones de secano, por tener rusticidad para un manejo agronómico de dosis de fertilización bajas y labores de cultivo limitadas; y con calidad de grano para la elaboración de tortillas.

Formación y evaluación de mestizos

En el ciclo primavera-verano 2016, en el Colegio de Postgraduados se formaron 34 mestizos utilizando como probador a un sintético de amplia base genética del programa de maíz del Colegio de Postgraduados, denominado P6.

En 2017 los mestizos se evaluaron en el Instituto Tecnológico Superior de Occidente del Estado de Hidalgo en Mixquiahuala, Hidalgo, ubicado a 2 000 msnm, con temperatura media anual de 18.4 °C y 480 mm de precipitación anual y en el Colegio de Postgraduados en Montecillo, estado

de México, ubicado a 2 265 msnm, con 16.4 °C de temperatura media anual y 546.7 mm de precipitación anual. Los ensayos se establecieron bajo el diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental consistió en dos surcos de 5 m de longitud y 0.80 m de ancho, se manejaron 50 000 plantas ha⁻¹ y como testigos se incluyó a los híbridos comerciales San José (H₁), San Josecito (H₂) y al probador P6.

Conducción de los ensayos

El manejo del cultivo en ambos ensayos se hizo con base en las recomendaciones técnicas de cada institución. En Montecillo se fertilizó con la dosis 120-60-60 y en Mixquiahuala no se aplicó fertilizante pues en esa localidad se riega con aguas residuales, con suficiente materia orgánica ‘aguas negras’, provenientes de la Ciudad de México. La siembra se realizó el 10 de mayo en Montecillo y el 26 de abril en Mixquiahuala.

Características evaluadas

Se determinaron los días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF), cuantificados a partir de que 50% + 1 de las plantas en la parcela expusieron anteras o estigmas, respectivamente; la asincronía floral (AsinF) fue la diferencia entre DFM y DFF. Las variables morfológicas y los componentes del rendimiento se determinaron con el valor promedio de cinco mazorcas representativas obtenidas de cada unidad experimental y fueron: número de hileras (Nhil) y número de granos por hilera (Ghil), longitud de mazorca (Lmz), diámetro de mazorca (Dmz) y diámetro de olote (Dolo), en cm; peso promedio de mazorca (Pmz) y peso de grano (Pgr), en kg.

El rendimiento de grano por unidad experimental (Rt_{UE}) fue determinado como: $Rt_{UE} = ((PMz1 + PMz2) * Id * ((100 - \%Hum)/100))/0.86$; donde Pmz1 y Pmz2 son los pesos, en kg, de mazorcas de orden primario y secundario, respectivamente; el índice de desgrane (Id), es la diferencia entre el peso de la mazorca y de su grano; %Hum, la humedad de la muestra proveniente de campo, determinada con el método de la estufa, factor de corrección de 0.86 para definir el rendimiento de grano con 14% de humedad. Con este se estimó el rendimiento de grano (Rto) en t ha⁻¹.

En campo se registró el número de mazorcas primarias (Mz1) y secundarias (Mz2), alturas de planta (Apta) y de mazorca (Amz), en cm, y la posición de la mazorca (Amz/Apta); el peso de 100 granos (P100grn), se cuantificó en g, en tres repeticiones.

Análisis de los datos

El análisis de los datos a través de ambas localidades se hizo como una serie de experimentos en el espacio, se efectuó un análisis de varianza combinado, con el SAS Institute (2004), sistema para análisis estadístico) así como la comparación de medias con la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05. Con los datos promediados a través de las localidades se realizó un análisis de componentes principales usando PRINCOMP (SAS Institute, 2004). Y con la matriz de correlaciones aproximadas entre las variables y los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) se realizó un análisis de dispersión gráfico en un ‘biplot’ (Gabriel, 1971) que se elaboró con NTSYS para PC (Rohlf, 2009).

Discriminación de líneas y selección de líneas sobresalientes

Con base en la expresión fenotípica de los mestizos, el análisis de componentes principales y el análisis de dispersión gráfico, se discriminaron las líneas que mostraron pobre desempeño en comparación con los testigos (P6, H₁ y H₂); es decir, cuando en la dispersión gráfica los mestizos se encontraron alejados de éstos últimos y no se asociaron con los vectores de las características evaluadas. Se consideró que las líneas que formaron a los mestizos con características superiores fueron las de aptitud combinatoria superior.

Análisis de varianza combinado

Se encontró que en la mayoría de las variables evaluadas hubo variación fenotípica entre los genotipos ($p \leq 0.01$) y que el efecto entre localidades fue diferenciado estadísticamente ($p \leq 0.01$) pero no hubo significancia estadística ($p \leq 0.01$) en su interacción (Gen x Loc; Cuadro 1); es decir, que la expresión de los genotipos presentó el mismo ordenamiento en cada localidad. Las diferencias entre genotipos se asociaron a la variación entre los mestizos, la cual se relacionó con la diversidad genética del germoplasma, al efecto *per se* de sus progenitores y a la combinación específica de cada línea con el probador. En un estudio similar, Velázquez-Cardelas *et al.* (2018a) asocian tales diferencias a la expresión contrastada entre los híbridos y los mestizos.

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia estadística de los valores de F en el análisis de varianza combinado.

FV	Gl	Rto	Pmz1	Pmz	Pgr	Dmz	Lmz	DFM	DFF	AsinF	Apta
Genotipos	36	2.7*	2.8*	1.1*	0.9*	0.1**	2.2*	36.6**	31.6**	4.4*	0.26*
Rep (Loc)	4	3.3 ^{ns}	3.6 ^{ns}	1.1 ^{ns}	1 ^{ns}	0.21 ^{ns}	2.4 ^{ns}	24.8**	15.7 ^{ns}	1.6 ^{ns}	1.1**
Loc	1	242.4**	160.2**	62.5**	40.4*	4.75**	91.1**	7322.6**	10434**	274.8**	456**
Gen x Loc	36	1.77 ^{ns}	2.2 ^{ns}	0.6 ^{ns}	0.51**	0.06	1.1 ^{ns}	10 ^{ns}	10.29 ^{ns}	4 ^{ns}	0.31*
Error	144	1.51	1.73	0.56	0.46	0.05	0.95	6.6	8.03	2.53	0.15
CV (%)		21.8	22.4	13.5	14.1	4.6	6.3	3.1	3.3	40	5.79
FV	Gl	Amz	Amz/Apta	Nhil	Ghil	Id	Dolo	Pmz2	P100grn	Mz1	Mz2
Genotipos	36	236*	0.003	2.35**	9.24*	0.004*	0.08**	0.27 ^{ns}	36.2**	91.3 ^{ns}	17.5 ^{ns}
Rep (Loc)	4	362*	0.004 ^{ns}	1.62 ^{ns}	8.19 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	0.06*	0.02 ^{ns}	20.7 ^{ns}	163.4 ^{ns}	1.5 ^{ns}
Loc	1	201495**	0.022**	43.61**	565**	0.007**	1.39**	41.5**	2.7 ^{ns}	330.8 ^{ns}	3512**
Gen x Loc	36	198.6 ^{ns}	0.002 ^{ns}	1.23 ^{ns}	3.4 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.26 ^{ns}	13.5 ^{ns}	76.9 ^{ns}	16.1 ^{ns}
Error	144	144.7	0.0001	0.85	5	0.0002	0.02	0.20	14.6	93.7	12.9
CV (%)		10.7	8.3	5.9	7.4	1.7	5.1	101.1	11.1	22.1	87

FV= fuente de variación; Gl= grados de libertad; Loc = localidades; Rto= rendimiento de grano; Pmz1= peso de mazorcas principales; Pmz= peso de mazorca; Pgr= peso de grano; Dmz= diámetro de mazorca; Lmz= longitud de mazorca; DFM= días a floración masculina; DFF= días a floración femenina; AsinF= asincronía floral; apta= altura de planta; Amz= altura de la mazorca; apta/Amz= posición de la mazorca; Nhil= número de hileras; Ghil= número de granos por hilera; Id= índice de desgrane; dolo= diámetro de olote; Pmz2= peso de mazorcas secundarias; P100grn= peso de cien granos; Mz1= número de mazorcas primarias; Nmz2= número de mazorcas secundarias; CV= coeficiente de variación, * = significativo al 0.05; ** = significativos al 0.01; ns, no significativo.

Entre localidades, las diferencias se asociaron con el efecto ambiental diferenciado, aunque la interacción Gen x Loc mostró que los genotipos tienen estabilidad (Cuadro 1), característica deseable para la selección y el mejoramiento genético. González-Huerta *et al.* (2008) y Velázquez-Cardelas *et al.* (2018a, b) demostraron la heterogeneidad del ambiente en el área ecológica de los Valles Altos de la Mesa Central, así como las limitantes de ésta para elegir a los genotipos superiores, pero en el presente estudio, puesto que Gen x Loc no fue significativa para la mayoría de variables evaluadas, se pudieron identificar mestizos con alto potencial de rendimiento, así como hacer inferencias sobre la aptitud combinatoria de las líneas que los formaron.

Análisis de componentes principales (ACP) y análisis de dispersión gráfico (ADG)

El ACP y ADG se realizaron con el valor promedio de las características evaluadas a través de ambas localidades debido a que Gen x Loc no fue significativa. Se observó que los dos primeros componentes principales describieron 48% de la variación total (Figura 1). Iezzoni y Pritss (1991) y Maji y Shaibu (2012) señalan que ambos componentes principales son suficientes para representar adecuadamente la variación de las variables evaluadas.

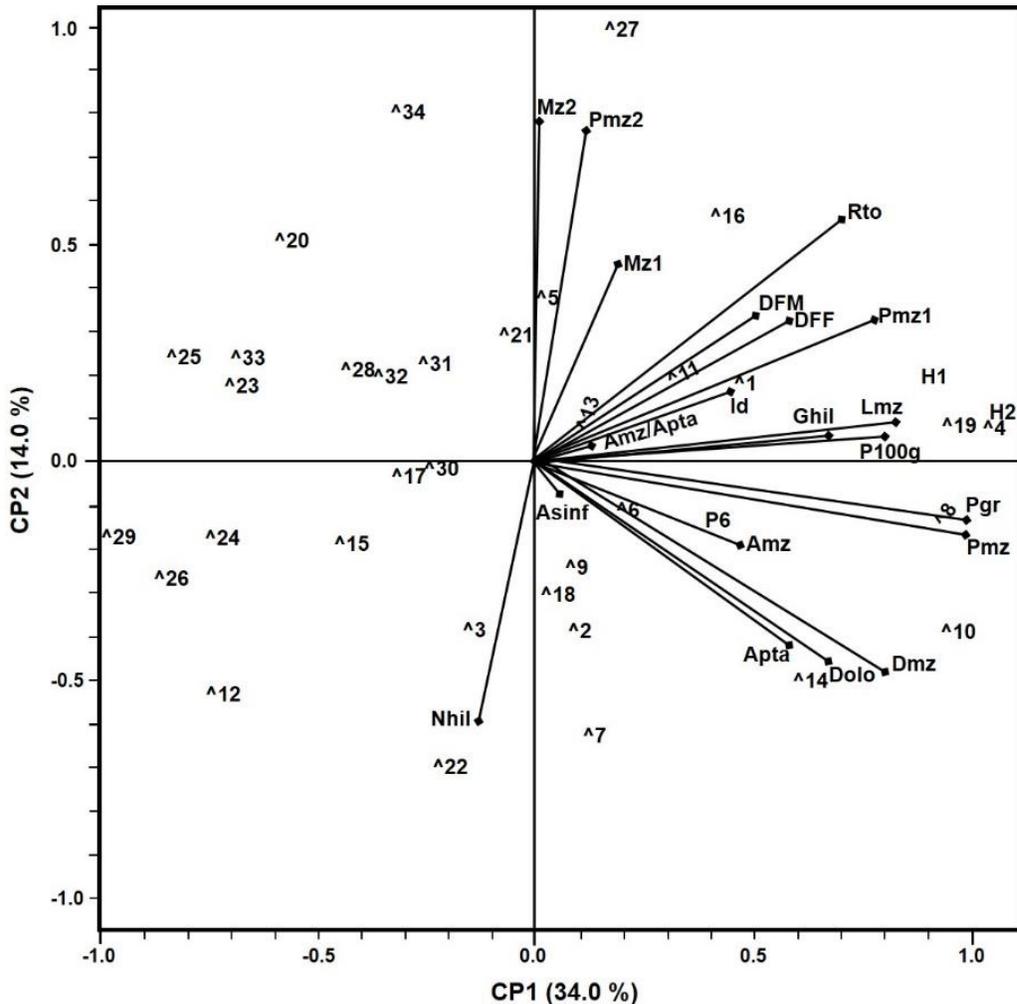


Figura 1. Biplot para 34 mestizos de maíz y 20 características evaluadas usando los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2).

Aunque Rto fue la característica de mayor relevancia en la explicación de la variación y el atributo principal a mejorar, se consideró que también otras características como Pmz1, Pgr, Pmz, Dmz, Lmz, P100grn y Mz2 fueron determinantes para la explicación de la variación. Asimismo, fueron útiles para discriminar a los mestizos y para identificar líneas sobresalientes, a través del comportamiento de éstos.

Con base en la longitud del vector de las características evaluadas (Figura 1), además de Rto, la selección se realizó considerando sólo tres variables: Pmz1, Pgr y Pmz2; Yan y Frégeau-Reid (2008); Maji y Shaibu (2012) efectuaron una simplificación similar del número de variables y señalaron que la reducción de la dimensionalidad mediante ACP tiene el beneficio de explicar la variación sin omitir información necesaria e importante para la selección de fenotipos interesantes. En el presente estudio se corroboró que el ACP representó una herramienta útil para la selección de genotipos en un programa de mejoramiento genético.

Con base en las características definidas, 16 mestizos se clasificaron como sobresalientes y el resto tuvo un comportamiento inferior al de los testigos (P6, H₁ y H₂). Los mestizos sobresalientes se ubicaron en los cuadrantes I y II, donde se observaron expresiones destacadas de algunos en alguna característica particular (Figura 1): ²⁷ en Pmz2, ⁸ en Pgr, ¹⁶ en rendimiento.

Al comparar a los mestizos con P6 se encontró que solamente ¹, ⁴, ⁵, ⁸, ¹⁰, ¹¹, ¹⁴, ¹⁶, ¹⁹ y ²⁷ lo superaron o tuvieron un comportamiento similar, por lo que se infiere que mostraron una expresión deseable en: Rto, Pmz1, Pmz, Dmz, Lmz, Pgr, Nmz2 y Pmz2 (Figura 1). Con base en la expresión de un probador, Velázquez-Cárdelas *et al.* (2018) demostraron que las poblaciones nativas poseen genes que pueden contribuir a mejorar el potencial productivo. Los mestizos ubicados en los cuadrantes III y IV (Figura 1) no fueron sobresalientes, pues mostraron limitada expresión fenotípica e interacción negativa entre las líneas que los conformaron y P6.

Los híbridos H₁ y H₂ (7.6 y 8 t ha⁻¹, datos no mostrados) tuvieron comportamiento similar a los mestizos sobresalientes (8.5 a 6.2 t ha⁻¹). Los mestizos ⁴, ¹⁶, ¹⁹ y ²⁷ superaron en Rto a H₂, por lo tanto, se pueden emplear como híbridos no convencionales. Estos resultados concuerdan con González-Huerta *et al.* (2008); Velázquez-Cardelas *et al.* (2018a, b) quienes demostraron que las poblaciones nativas tienen potencial productivo en el área ecológica de Valles Altos Centrales de México.

El análisis permitió realizar una clasificación integral de las líneas para discriminar más de 60% de ellas, las líneas superiores y se infiere, de aptitud combinatoria superior fueron las que en combinación con P6 mostraron la expresión fenotípica superior: mestizos ¹, ⁴, ⁵, ⁸, ¹⁰, ¹¹, ¹⁴, ¹⁶, ¹⁹ y ²⁷.

El uso de ACP y ADG hizo este proceso práctico y sencillo, pues permitió visualizar fácilmente en el biplot las interrelaciones con los mestizos. Aunque la evaluación en campo y el conocimiento profundo de las características de los genotipos por parte del fitomejorador es fundamental, se verificó que el uso del análisis de dispersión gráfico resulta ventajoso para la identificación de progenitores sobresalientes.

Conclusiones

La selección de genotipos mediante el uso del análisis multivariado aplicado a los mestizos permitió la selección de las líneas con aptitud combinatoria superior de manera sencilla y eficaz, conjuntamente, el análisis de dispersión gráfico permitió sintetizar la variación sin omitir información importante para la selección de los genotipos, además de que fue posible, dentro de los sobresalientes, asociarlos con alguna característica de interés para el mejoramiento y a la cual se debió su expresión destacada.

Los mestizos seleccionados tuvieron alta productividad y características agronómicas-morfológicas que son de importancia para un nuevo programa de mejoramiento y con posibilidades de ser aprovechados como híbridos experimentales no convencionales.

Literatura citada

- Gabriel, K. R. 1971. The biplot graphic display of matrices with applications to principal components analysis. *Biometrika*. 58(3):453-467. Doi: 10.2307/2334381.
- González, H. A.; Vázquez, G. L. M.; Sahagún C. J. y Rodríguez, P. J. E. 2008. Diversidad fenotípica de variedades e híbridos de maíz en el Valle de Toluca-Atlacomulco, México. *Revi. Fitotec. Mex.* 31(1):67-76.
- Hallauer, R. A.; Carena, M. J. and Miranda Filho, J. B. 2010. Handbook of plant breeding. Quantitative genetics in maize breeding Vol. 6. Ed. Springer. 663 p. Doi 10.1007/978-1-4419-0766-0.
- Iezzoni, F. A. and Pritts, P. M. 1991. Application of principal component analysis to horticultural research. *HortScience* 26(4):334-338. <http://hortsci.ashspublications.org/content/26/4/334.fullpdf+html>.
- Jenkins, M. T. 1929. Correlation studies with inbred and crossbred strains of maize. *J. Agric. Res.* 39(9):677-721. <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-15931>.
- Jugenheimer, R. H. 1981. Maíz. Variedades mejoradas, métodos de cultivo y producción de semillas. Ed. Limusa. 841 p.
- Maji, A. T. and Shaibu, A. A. 2012. Application of principal component analysis for rice germplasm characterization and evaluation. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 4(6):87-93. Doi: 10.5897/JPBCS11.093.
- Rohlf, F. J. 2009. NTSYSpc: numerical taxonomy system. Ver. 2.21h for Windows. Exeter Software. Setauket, New York. 31 p.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT User's Guide: Version 9.2 SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA. 1689 p.
- Velázquez-Cardelas G. A.; González-Huerta, A.; Pérez-López, D. J. y Castillo-González, F. 2018b. Análisis de híbridos comerciales y mestizos de maíz formados con germoplasma de INIFAP y del CIMMYT. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(3b):615-627.
- Velázquez-Cardelas, G. A.; González-Huerta A; Pérez-López, D. J. y Castillo-González, F. 2018a. Comportamiento de mestizos de maíz en tres localidades del Centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(6):1217-1230.
- Yan, W. and Frégeau-Reid, J. 2008. Breeding Line Selection Based on Multiple Traits. *Crop Sci.* 48(2):417-423. Doi:10.2135/cropsci2007.05.0254.