

POTENCIAL DE RENDIMIENTO Y ESTABILIDAD DE COMBINACIONES GERMOPLÁSMICAS FORMADAS ENTRE GRUPOS DE MAÍZ

YIELD POTENTIAL AND STABILITY OF GERMOPLASM COMBINATIONS DEVELOPED AMONG MAIZE GROUPS

Humberto de León Castillo^{1*}, Froylán Rincón Sánchez¹, M. Humberto Reyes Valdés¹, Daniel Sámano Garduño¹, Gaspar Martínez Zambrano¹, Rolando Cavazos Cadena² y Juan de Dios Figueroa Cárdenas³

¹ Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN). Buenavista CP 56315 Saltillo, Coah. Tel. y Fax 01(844) 4110221. Correo electrónico: hleonc62@hotmail.com ² Departamento de Estadística y Cálculo, UAAAN. ³ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Querétaro. Libramiento Norponiente No 2000 Fracc. Real de Juriquilla, Querétaro C. P. 76230.

* Autor para correspondencia

RESUMEN

El conocimiento y clasificación del germoplasma están directamente asociados con las posibilidades de éxito en todo programa de mejoramiento genético. Para documentar el comportamiento de las combinaciones entre cinco grupos germoplásmicos contrastantes del área de El Bajío e identificar las de más potencial en rendimiento y estabilidad, en este trabajo se compararon modelos lineales de efectos fijos y mixtos en tres ambientes de evaluación contrastantes, durante el verano de 2002. Simultáneamente se analizaron las tendencias al agrupamiento de las combinaciones, de los ambientes, así como un detallado estudio de la interacción entre estos factores, mediante gráficos “biplot” obtenidos de los modelos “efectos principales aditivos y la interacción multiplicativa” (AMMI o gráfica GE) y el de “regresión en los sitios” (SREG o gráfica GGE). Se encontró que los modelos lineales mixtos son de mayor precisión que los de efectos fijos, tanto en el cálculo de estimadores como de predictores, porque logran espacios de inferencia más amplios. Las representaciones gráficas de los “biplots” clasifican los efectos principales de una manera sencilla de interpretar; estiman la magnitud y el sentido de la interacción genotipo x ambiente; permiten visualizar la mejor combinación germoplásmica por ambiente, y hacen más eficiente la selección. Las combinaciones germoplásmicas de mayor potencial de rendimiento para la región de El Bajío, son Maíz enano x Maíz tropical y Maíz enano x maíz de alta calidad de proteína (QPM); y el grupo germoplásmico más versátil es el de Maíz enano porque induce excelentes combinaciones heteróticas al cruzarse con todos los demás grupos germoplásmicos.

Palabras clave: *Zea mays* L. modelos mixtos, interacción genotipo-ambiente, El Bajío.

SUMMARY

Germplasm knowledge and classification are directly associated to possibilities of success in any plant breeding program. In order to assess the behavior of combinations among five contrasting gene pools adapted to El Bajío area, and to identify those with highest yields and stability, several linear models with a combination of fixed and mixed effects in three contrasting environments, were compared during the Summer 2002. Grouping tendencies for combinations and environments were simultaneously evaluated along with the interaction among these factors, by using biplot graphics generated by the “additive main effects and multiplicative interaction” (AMMI or GE graphing), and “sites regression” (SREG or GGE graphing) models. The results indicated that the mixed lineal models provide more precise estimators and predictors than those based on fixed effects, by achieving wider inference spaces. The biplots obtained from the GE and GGE programs show the following advantages: the classification and clustering of main effects allows an easier interpretation; they estimate the magnitude and the sense of the genotype x environment interaction; and they allow visualization of the best performing combinations for a particular environment, thus allowing a better selection. The heterotic combinations with the highest yielding potential for the El Bajío region were Dwarf x Tropical maize and Dwarf x QPM, and the most versatile heterotic group for heterosis was Dwarf corn, which produces excellent combinations when crossed with all the other heterotic groups.

Index words: *Zea mays* L., mixed models, genotype x environmental interaction, El Bajío.

INTRODUCCIÓN

En todo programa de mejoramiento dirigido a la producción de híbridos, entre mayor sea el conocimiento y

clasificación de su germoplasma en grupos y sus respectivos patrones heteróticos, mayores serán las posibilidades de éxito en la generación y mejoramiento de híbridos (Lamkey *et al.*, 1993; Goldman, 1998). En el programa de mejoramiento genético correspondiente a la región ecológica de El Bajío, del Instituto Mexicano del Maíz (IMM) "Dr. Mario E. Castro Gil" de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ordinariamente se manejan cruzamientos entre materiales endogámicos derivados de cinco grupos contrastantes, sin tener a la fecha una clasificación documentada del potencial de estos cruzamientos.

El vigor híbrido se expresa solamente en cruzamientos pero no en cualquier tipo de cruzamiento, por ello es importante elegir el germoplasma adecuado para la producción de híbridos. De los primeros conceptos relacionados con la explotación de este fenómeno en maíz (*Zea mays* L.) destacan el de la línea pura, que ha sido el punto de partida para el estudio de la heterosis y sus orígenes genéticos, y los de habilidad combinatoria general y específica acuñados por Sprague y Tatum (1946). La primera se asocia con el desempeño potencial de los progenitores y la segunda al desempeño de la F_1 de los híbridos.

Otros conceptos más recientes, relacionados con la formación de híbridos y el fenómeno de heterosis son los de grupos y patrones heteróticos. El primero, de acuerdo con Melchinger y Gumber (1998), se usa para referirse a un grupo de individuos, relacionados o no, que provienen de la misma o diferente población pero que muestran similar comportamiento en aptitud combinatoria y heterosis cuando se cruzan con individuos de otro grupo genéticamente diferente. Ejemplos de grupos heteróticos de uso generalizado para Estados Unidos son Reid Yellow Dent y Lancaster Sure Crop; para Europa US Dent y European Flint; en México los maíces tropicales y maíces subtropicales; y para el mundo los maíces locales y maíces exóticos.

Los fitomejoradores tratan de hacer más eficiente el uso del germoplasma disponible en los programas de hibridación mediante la identificación y explotación de los patrones heteróticos específicos para cada programa, dado que a pesar de que se conocen grupos germoplásmicos complementarios de uso generalizado éstos no pueden ser considerados uniformes o únicos, lo que abre la posibilidad de detectar subgrupos dentro de ellos.

En México quienes más han trabajado y publicado sobre patrones heteróticos son los investigadores del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), y las publicaciones que más relación tienen con este tipo de investigación son la de Crossa (1990) y la de Mickelson *et al.* (2001), en las que destacan la complementariedad que existe entre maíces de origen tropical al

cruzarse con maíces del subtrópico, Eto blanco x Tuxpeño y maíces locales x materiales exóticos.

Melchinger y Gumber (1998) definen el término patrón heterótico como un par de grupos heteróticos complementarios que al cruzarse producen descendencia que exhibe una alta heterosis y un excelente desempeño de sus híbridos, en la mayoría de los casos; agregan que su impacto en los programas de mejoramiento es muy alto, porque predeterminan la manera adecuada de emplear el germoplasma en la generación de combinaciones híbridas.

Para la identificación de potenciales grupos y patrones heteróticos nuevos en un programa de mejoramiento particular se requiere de una eficiente evaluación y clasificación de las fuentes de germoplasma disponibles, así como de sus combinaciones, realizadas entre cruzamientos dialélicos de grupos o directamente del cruzamiento entre líneas de diferente grupo germoplásmico (Hallauer *et al.*, 1988). Para ello se recomienda conocer su comportamiento con base en la evaluación de varios ambientes (localidades y años) representativos del área del interés, con el fin de generar estimaciones de parámetros genéticos y predicciones más precisas, lo que hará más confiable la selección de los mismos y permitirá tomar decisiones más acertadas en los programas de mejoramiento (Crossa, 1990).

La interacción genotipo x ambiente (IGA) es la respuesta diferencial de los genotipos en los ambientes de evaluación; este fenómeno es una constante preocupación para los fitomejoradores, especialmente cuando su magnitud es grande, ya que dificulta la elección y recomendación de genotipos estables y torna lento el avance de la selección. Al respecto, Coutiño-Estrada y Vidal-Martínez (2003) indican que con metodologías apropiadas de estadística y de mejoramiento es posible entender las causas de la IGA, mientras que Yan *et al.* (2000) reportan una metodología para interpretar los patrones de respuesta genética, ambiental y de la IGA para ensayos hechos en varios ambientes.

Resultados importantes de la respuesta a la IGA se logran trabajando con el modelo de efectos principales aditivos y de la interacción multiplicativa (AMMI, actualmente identificada como gráfica GE), el cual fue originalmente propuesto por Gollob (1968) que comparten el mérito con Zobel *et al.* (1988) quienes acuñaron el término de AMMI. Hasta la fecha el modelo ha pasado por una serie de adecuaciones hasta llegar a lo que hoy se conoce como gráfica GE, que no es otra cosa que la conjunción del análisis de varianza convencional con el análisis de componentes principales (ACP).

Con los resultados generados del modelo anterior mediante el ACP aplicado a la interacción genotipo ambiente, es posible formar un gráfico denominado “biplot”, que tiene la particularidad de ser muy descriptivo para interpretar los patrones de respuesta de los efectos principales y de la propia interacción (Zobel *et al.*, 1988; Crossa, 1990; Crossa *et al.*, 1991). Originalmente el “biplot” fue descrito por Gabriel (1971), y su denominación obedece a que en la figura se clasifican los puntos en dos tipos, en este caso en genotipos y ambientes.

El modelo SREG (después de varias modificaciones actualmente es reconocido como gráfica GGE) fue propuesto para explorar la respuesta de los genotipos a ambientes específicos; es prácticamente el mismo que el modelo anterior, sólo que los efectos principales de los genotipos, que en el modelo AMMI se estiman como efectos aditivos, en el SREG se envían al residual para modelarlo de forma multivariada mediante el ACP junto con la interacción (Yan *et al.*, 2000; Burgueño *et al.*, 2003). Un mérito exclusivo de este modelo es que permite agrupar ambientes y genotipos con similar desempeño e identificar gráficamente cuál es el genotipo con mayor potencial en cada subgrupo de ambientes.

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) Identificar la combinación germoplásmica más promisoría para localidades del área de El Bajío, para considerarla como posible patrón heterótico a seguir; ii) Analizar los patrones de respuesta de las combinaciones germoplásmicas y de los ambientes de evaluación, atendiendo a la interacción genotipo-ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

Se consideraron cinco grupos germoplásmicos que se representaron cada uno con siete líneas de buen comportamiento agronómico, con excepción del grupo QPM que sólo participó con cinco líneas. Con este enfoque se pretendió detectar la mejor combinación germoplásmica con base en el promedio obtenido por el desempeño de las cruas simples.

A continuación se describen cada uno de los cinco grupos:

Grupo 1. Grupo tropical, cuyas líneas se derivaron de poblaciones de origen 100 % tropical; son de ciclo biológico variado, altamente seleccionadas y no fueron derivadas de una población común.

Grupo 2. Grupo de maíz enano, cuyas líneas fueron derivadas de una población de plantas braquíticas que soportan altas densidades de población. Responden positivamente a la aplicación de insumos y muestran una gran plasticidad de adaptación en combinaciones híbridas. Tienen madurez diversa por lo que se pueden encontrar líneas precoces a intermedias, entrenudos cortos debajo de la mazorca, tendencia a la prolificidad, hojas cortas y erectas, y espigas compactas.

Grupo 3. Grupo arquetípico, cuyas líneas fueron derivadas de una población constituida por plantas con excelentes atributos agronómicos, que se transformaron de su versión enana a plantas normales mediante un programa continuo de cuatro retrocruas, donde el donador fue una población de amplia y selecta base genética con adaptación al área de El Bajío. Sus individuos son de altura intermedia, pocas hojas, éstas cortas y erectas, espiga compacta, madurez intermedia, alto índice de cosecha y adaptación a regiones con altitudes de 1000 a 2000 m.

Grupo 4. Grupo exótico, cuyas líneas se derivaron de una población constituida mediante la recombinación de híbridos comerciales a los que previamente se les seleccionó por poseer altos efectos de aptitud combinatoria general.

Grupo 5. Grupo QPM, que fue constituido a partir de líneas proporcionadas por el programa de maíz del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); tales líneas poseen un alto contenido de los aminoácidos lisina y triptófano, y adaptación al área de El Bajío.

Las combinaciones germoplásmicas se hicieron mediante cruzamientos entre líneas de diferente grupo que coincidieron en la floración. Las polinizaciones fueron realizadas en la estación experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicada en Tepalcingo, Morelos, durante el ciclo otoño-invierno 2001-2002, y dieron como resultado la obtención de 172 híbridos simples que incluyen nueve combinaciones germoplásmicas; los datos de la presente investigación provienen de la evaluación de estos híbridos experimentales (Cuadro 1).

Las 172 cruas simples fueron evaluadas en tres ambientes: Celaya, Gto. ; Santa Ana Pacueco, Gto. y Gral. Cepeda, Coah., durante el ciclo primavera – verano 2002 bajo un diseño de bloques incompletos con dos repeticiones por localidad. La parcela experimental fue de un surco de 0.75 m de ancho, con 21 plantas a 0.19 m entre planta y planta. La única variable considerada en la comparación y selección de las combinaciones germoplásmicas fue el

rendimiento de mazorca en t ha⁻¹ a 15.5 % de humedad, por ser la variable que más se relaciona con la expresión de la heterosis.

Cuadro 1. Número de cruzamientos por combinación germoplásmica.

Patrón	Núm. de cruas
P1 = Tropical x Enano	17
P2 = Tropical x Arquetipo	14
P3 = Tropical x Exótico	25
P4 = Enano x QPM	11
P5 = Arquetipo x QPM	4
P6 = Exótico x QPM	10
P7 = Enano x Arquetipo	22
P8 = Enano x Exótico	32
P9 = Arquetipo x Exótico	37
total de cruas	172

Análisis estadísticos

Para la comparación de las combinaciones germoplásmicas se realizó un análisis de varianza conjunto a través de ambientes. Se compararon tres procedimientos estadísticos para clasificar grupos de tratamientos en función del rendimiento.

1. Medias aritméticas simples, las que tradicionalmente se han empleado para elegir los materiales promisorios y para realizar las recomendaciones.

2. Estimadores, de dos tipos: i) Medias ajustadas por mínimos cuadrados obtenidas mediante el procedimiento GLM de SAS (SAS, 1996), donde los efectos se consideran fijos; ii) Medias ajustadas por la técnica del mejor estimador lineal insesgado (MELI) en donde se consideraron como factores de efectos aleatorios las localidades, repeticiones dentro de localidad, bloques dentro de repeticiones y localidades y combinaciones por localidad. Como factor de efectos fijos se consideraron las combinaciones germoplásmicas; los estimados se obtuvieron con el procedimiento MIXED de SAS (SAS, 1996).

3. Predictores, que se calcularon mediante la técnica del mejor predictor lineal insesgado (MPLI), donde todos los efectos del modelo fueron declarados aleatorios.

En el análisis de la IGA se utilizaron las figuras “biplot” obtenidas como parte de los resultados de los gráficos GE, y el de GGE propuesto por Burgueño *et al.* (2003).

Para el AMMI se empleó el siguiente modelo.

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + R_{ij}$$

El modelo SREG que se usó para analizar la respuesta de las combinaciones germoplásmicas a ambientes específicos (Crossa *et al.*, 2002), fue:

$$Y_{ij} = \mu + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + R_{ij}$$

donde: Y_{ij} = rendimiento promedio de la i -ésima combinación germoplásmica en el j -ésimo ambiente; μ = media general; g_i = efecto de la i -ésima combinación germoplásmica; e_j = efecto del j -ésimo ambiente; λ_k = raíz cuadrada del vector característico del k -ésimo eje del ACP; α_{ik} = calificación del ACP para el k -ésimo eje del i -ésimo genotipo; γ_{jk} = calificación del ACP para el k -ésimo eje del j -ésimo ambiente; R_{ij} = residual del modelo con una distribución normal independiente con media cero y va-

$$\text{rianza} = \frac{\sigma^2}{r}.$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer paso se dio al detectar mediante el análisis de varianza, diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) para patrones heteróticos, ambientes de evaluación y la interacción entre ambos (datos no incluidos).

En el Cuadro 2 se resumen los resultados de la clasificación de las combinaciones germoplásmicas, donde se aprecia que los valores de los errores estándar (ee) asociados al comportamiento de cada combinación germoplásmica están correlacionados negativamente con el tamaño de muestra, lo que coincide con lo encontrado por Snedecor y Cochran (1989).

Cuando se utiliza la media aritmética simple de las seis repeticiones como criterio de selección, las combinaciones germoplásmicas se clasifican en tres grupos estadísticamente diferentes. Aunque por definición parece que se está haciendo lo correcto al comparar con base en los promedios aritméticos, de acuerdo con Gauch (1992) la forma en que ésta es calculada no la sitúa entre las más recomendadas para la toma de decisiones, porque en su estimación no considera las varianzas existentes entre y dentro de las combinaciones, y tampoco existe suficiente precisión en el cálculo del ee de las medias, que no incluyen en su fórmula las varianzas de los efectos declarados aleatorios ni de las covarianzas ambientales.

Muy similar fue la clasificación lograda con el procedimiento de mínimos cuadrados bajo el diseño de bloques incompletos al azar, aunque los patrones cambian de valor y de orden de clasificación, lo que se atribuye a que este

procedimiento considera el efecto del error, por lo que se infiere que la estimación es más precisa y confiable que la anterior metodología; se favorece así la eficiencia en la selección y en la toma de decisiones. Sin embargo, de acuerdo con McLean *et al.* (1991), el estimador y los *ee* son sesgados porque no toman en cuenta el efecto de las variables de clasificación consideradas aleatorias, lo que en un momento dado podría favorecer a un tratamiento en particular que estuviera colocado en un bloque con mejores condiciones que el resto, y eso afectaría la selección.

En la clasificación obtenida mediante la técnica del MELI, sólo se observan dos grupos estadísticamente diferentes y considera los efectos de los ambientes, de los bloques dentro de los ambientes y los de la IGA en la comparación de las combinaciones germoplásmicas. Por tanto, los *ee* asociados con la media de acuerdo con Stroup (1989a), se calculan más correctamente que en los procedimientos anteriores. Stroup (1989a) sugiere la aplicación de este modelo en los programas de mejoramiento por la mayor precisión lograda en los estimados, lo que se traduce en selecciones y recomendaciones más confiables.

En el cálculo del mejor predictor lineal insesgado (MPLI) se declararon aleatorios todos los efectos del modelo, con la intención de obtener un valor de las combinaciones germoplásmicas pero que incluya en su cálculo, además de los efectos principales, los efectos de las combinaciones germoplásmicas (tamaño de muestra), de los ambientales, los de la IGA y todas sus posibles covarianzas. De acuerdo con Stroup (1989b), esta técnica tiene más valor cuando los datos son desbalanceados, que es la clara

situación del presente estudio, el cual difícilmente podría haber sido analizado e interpretado con confiabilidad sin el empleo de los modelos mixtos, y en particular del MELI. Se incluye para cada caso el error estándar de la predicción para estimar los intervalos de confianza donde se encuentra la media verdadera, y para hacer notar cómo se logra tener más homogeneidad entre los mismos que con cualquier otra técnica de las aquí empleadas.

Las predicciones del comportamiento de las combinaciones germoplásmicas indican lo que se puede esperar más allá de los cruzamientos evaluados; es decir, permite hacer comentarios más amplios hacia la población de referencia, tal como lo mencionan Balzarini y Milligan (2003). Para obtener estos valores se empleó la técnica de modelos mixtos que no dejan de ser modelos lineales, a los que simplemente se les declaran algunos o todos los términos aleatorios, para poder estimar las varianzas de los mismos e incorporarlas en el cálculo del predictor (Cadena y Castillo, 2000). La mayor ventaja práctica es que se pueden hacer recomendaciones más precisas que las logradas con la simple media aritmética.

Con la intención de hacer una selección más adecuada, además del ordenamiento logrado por el MELI de las combinaciones germoplásmicas y dado que la IGA fue significativa ($P \leq 0.01$), se planeó obtener información que permita mejorar las posibilidades de éxito, asistidos por los resultados proporcionados por los programas de cómputo GE y GGE publicados por Burgueño *et al.* (2003).

Cuadro 2. Medias de rendimientos en $t\ h^{-1}$ a 15.5 % de humedad, estimadores y predictores de nueve combinaciones germoplásmicas evaluadas en tres ambientes en 2002.

Patrón	Media aritmética		<i>ee</i>	Estimador [†]		<i>ee</i>	Estimador ^{††}		<i>ee</i>	Predictor ^{†††}
P1	14.37	a ^{††††}	0.54	14.16	a	0.32	14.12	a	2.27	13.89 ± 2.25
P2	13.22	bc	0.67	12.47	bc	0.41	12.60	b	2.28	12.85 ± 2.26
P3	13.02	bc	0.32	12.43	c	0.26	12.51	b	2.26	12.65 ± 2.24
P4	13.96	ab	0.50	13.88	ab	0.35	13.90	ab	2.27	13.70 ± 2.26
P5	13.82	abc	0.73	13.70	abc	0.58	13.66	ab	2.32	13.46 ± 2.28
P6	12.86	c	0.53	12.56	bc	0.37	12.54	b	2.28	12.74 ± 2.26
P7	12.91	c	0.33	12.72	bc	0.25	12.76	ab	2.26	12.87 ± 2.24
P8	13.25	bc	0.34	13.09	bc	0.20	13.11	ab	2.25	13.13 ± 2.24
P9	13.05	bc	0.27	12.79	bc	0.19	12.85	ab	2.25	12.92 ± 2.24
Promedio			0.47			0.325			2.27	2.25

ee = Error estándar; [†] = Media ajustada por cuadrados mínimos; ^{††} = Media ajustada por máxima verosimilitud restringida mediante la técnica del mejor estimador lineal insesgado (MELI); ^{†††} = Media ajustada por máxima verosimilitud restringida mediante la técnica del mejor predictor lineal insesgado (MPLI); ^{††††} Comparación múltiple de medias con base en contrastes ($P \leq 0.05$), y los valores con las mismas letras son estadísticamente iguales.

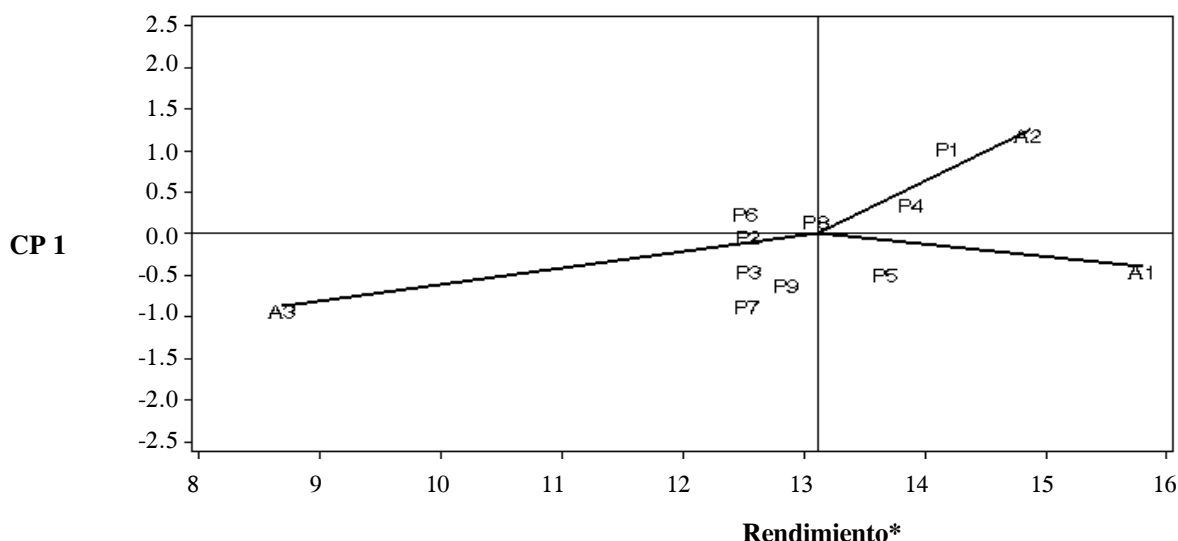
En la Figura 1 se representa la respuesta a la interacción mediante el modelo GE en donde se consideró solamente al primer componente principal, el cual aporta el 63 % de la suma de cuadrados debida a la IGA. La interpretación gráfica resume el comportamiento de las combinaciones germoplásmicas, los ambientes y la interacción entre ambos. El eje de las abscisas refleja las diferencias entre los componentes principales mientras que el de las ordenadas (componente principal 1) muestra el efecto de la IGA.

Las combinaciones germoplásmicas se clasificaron en tres grupos. (Figura 1). El primero, constituido por las combinaciones 1, 4 y 5 que muestran potenciales de rendimiento por arriba de la media, exhiben coeficientes de interacción positivos y negativos y es más marcada la interacción positiva para la combinación 1 (Tropical x Enano), por lo que se le considera inestable, responde mejor en ambientes favorables; el grupo 4 muestra una tendencia similar, mientras que el grupo 5 tiene coeficiente de interacción negativo pero de baja magnitud, es decir, responde mejor en ambientes pobres.

El segundo grupo lo forman las combinaciones germoplásmicas 6, 2, 3, 7 y 9, que tienen un promedio de rendimiento inferior a la media; el más estable en este

grupo es la combinación Tropical x Arquetipo (2). El tercer grupo lo constituyó la combinación Enano por Exótico (8) que tiene un coeficiente de interacción muy cercano a cero; de acuerdo con lo planteado por Zobel (1990) se le considera estable, con un rendimiento muy cercano a la media.

Con respecto a los ambientes, el “biplot” de la Figura 1 los clasifica en dos grupos; en uno quedan las localidades de Celaya y Sta. Ana Pacueco (1 y 2) las cuales tienden a discriminar de una manera similar a las combinaciones germoplásmicas, y ambas muestran un potencial de rendimiento superior a la media: 15.795 y 14.865 t ha⁻¹ respectivamente. Con relación a la interacción, la localidad de Celaya muestra un coeficiente de interacción negativo pero cercano a cero, por lo que se le considera un ambiente que representa la tendencia promedio de los patrones a través de ambientes, de acuerdo con lo sugerido por Kempton (1984). El otro grupo lo forma la localidad de General Cepeda (A3) con potencial de rendimiento muy inferior a la media (8.696 t ha⁻¹) y un coeficiente de interacción negativo. Estos resultados sugieren que Gral. Cepeda no es un ambiente representativo del mega-ambiente denominado El Bajío, ya que su efecto en la interacción es de una magnitud tal que afecta la precisión en la selección.



*= Toneladas por hectárea de mazorca al 15.5 % de humedad, CP 1 = Primer componentes principal; P = Combinaciones germoplásmicas; A1 = Celaya; A2 = Sta. Ana Pacheco; A3 = Grtal. Cepeda

Figura 1. Respuesta a la interacción gentipo-ambiente de nueve combinaciones germoplásmicas evaluadas en tres ambientes en 2002.

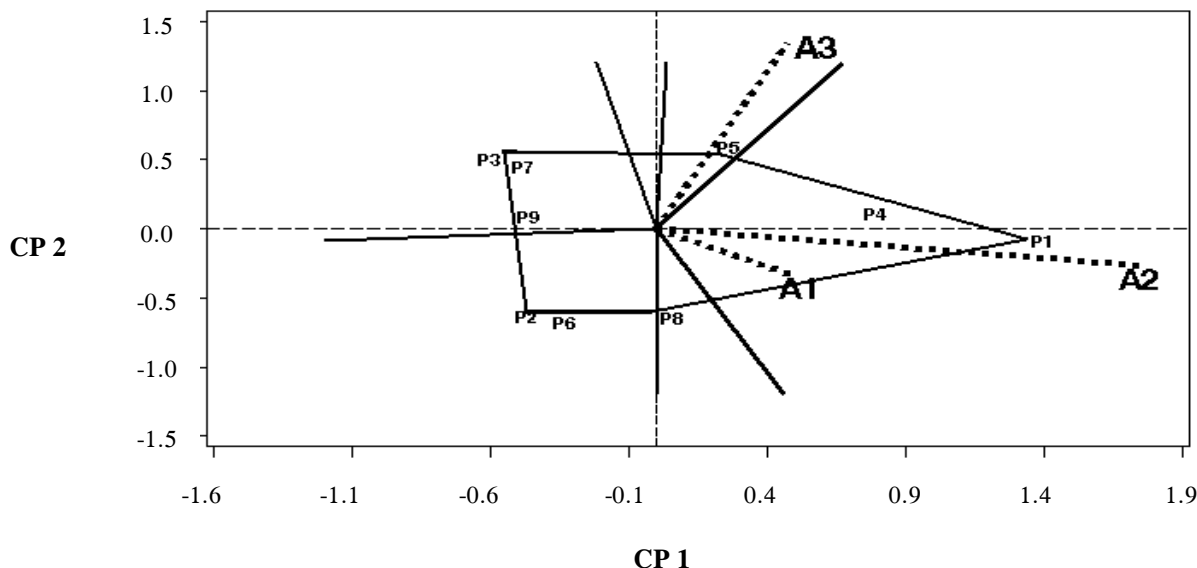
Se infiere de estos resultados que uno de los factores que más influye en la agrupación de ambientes es la ubicación geográfica con referencia a la latitud y la longitud; ya que entre los dos primeros sitios hay una distancia de 200 km mientras que entre éstos y el tercer ambiente la distancia promedio es de 800 km; otros factores son la precipitación pluvial y la fertilidad del suelo, que son más favorables en Celaya y Sta. Ana Pacueco.

Para analizar la respuesta de adaptación de los patrones a los ambientes de evaluación se empleó la gráfica GGE (Figura 2), en la que se forma un polígono al unir los puntos de los vectores de las combinaciones germoplásmicas de mayor longitud de cada cuadrante; posteriormente se traza una perpendicular por cada lado del polígono con relación al origen, lo que ocasiona que los sitios y patrones sean separados en sectores, donde la combinación en el vértice de cada sector es el que tiene mejor desempeño en los ambientes incluidos en ese sector.

En la Figura 2 se observa que en un sector formado en el polígono quedó incluido el ambiente 3 asociado con la combinación germoplásmica 5; es decir, en la localidad de Gral. Cepeda la combinación de mejor desempeño es el Arquetipo x QPM. En otro sector quedaron incluidos los ambientes 1 y 2 (Celaya y Sta. Ana Pacueco), ambos ubicados en el sector donde el vértice corresponde a la com-

binación 1 (Enano x Tropical), de lo que se infiere que éste es el que muestra el mejor potencial de rendimiento en ambas localidades. En este sector también queda incluida la combinación 4 (Enano x QPM) la cual expresa un adecuado potencial de rendimiento en ambas localidades.

Asimismo, se puede observar en este sector que la combinación 1 muestra el vector de mayor longitud, lo que según Yan *et al.* (2001) está directamente correlacionado con el potencial de rendimiento, y por su cercanía al origen del segundo eje se le considera el más estable. Por tanto, es la combinación germoplásmica más cercana a la ideal para continuar trabajando, seguida por los patrones 4 y el 5, aunque éste último muestra más efectos de IGA. De acuerdo con lo mencionado por Yan *et al.* (2000 y 2001), el ambiente que mejor discrimina a las combinaciones germoplásmicas en evaluación es el A2 (Sta. Ana Pacueco) por tener el vector de mayor longitud, mientras que el que mejor representa el comportamiento promedio de los ambientes es el A1 (Celaya), lo que concuerda con lo obtenido en la Figura 1. Esta información es muy valiosa para el programa de mejoramiento, que al no contar con recursos suficientes para evaluar materiales en varios ambientes se podría considerar que los resultados obtenidos en el ambiente de Celaya son un buen indicador del potencial de los nuevos híbridos en el área de El Bajío.



CP = Componentes principales; P = Combinaciones germoplásmicas evaluadas en tres ambientes.

Figura 2. Respuesta adaptativas de nueve combinaciones germoplásmicas evaluadas en tres ambientes.

Algunas ventajas de las representaciones gráficas generadas por los modelos anteriores son: 1) Logran clasificar el comportamiento de las combinaciones germoplásmicas y ambientes de evaluación de una manera sencilla de interpretar, y permiten agrupar a los de comportamiento similar para poder elegir los que más convienen al interés del programa; 2) Logran estimar en el sentido y magnitud la IGA; y 3) Permiten visualizar el patrón que muestra un mejor comportamiento en un ambiente determinado. Estas ventajas facilitan y hacen más eficiente la selección al modelar los efectos de la IGA que preocupan a los fitomejoradores.

CONCLUSIONES

De los cinco grupos germoplásmicos incluidos en el presente estudio, el que demostró ser el más versátil fue el maíz Enano al lograr colocar sus cuatro combinaciones entre los de comportamiento estadísticamente superior.

La combinación germoplásmica con mejor respuesta de rendimiento y adecuada estabilidad para la región de El Bajío fue Enano x Tropical, la cual puede ser considerada como un patrón heterótico para la región seguida por la combinación Enano x QPM.

El potencial detectado en los ambientes para clasificar las combinaciones germoplásmicas determinó que Celaya es, en promedio, el ambiente que mejor representa el comportamiento de las combinaciones germoplásmicas para la región de El Bajío. En cambio, por la gran divergencia exhibida en General Cepeda con relación a la clasificación de las combinaciones germoplásmicas en comparación con la lograda por los otros dos ambientes, tal ambiente no debe ser incluido como localidad representativa del área de El Bajío en futuras evaluaciones.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haber financiado parcialmente la realización del presente trabajo el cual forma parte del proyecto 41264 "Estudio de los componentes genéticos y fisiológicos asociados con caracteres de calidad en cinco grupos heteróticos de maíz".

BIBLIOGRAFÍA

- Balzarini M, S Milligan (2003)** Best linear unbiased prediction (BLUP) for genotype performance. *In: Handbook of Formulas and Software for Plant Geneticists and Breeders*. M S Kang (ed). Food Products Press. New York. pp:181-191.
- Burgueño J, J Crossa, M Vargas (2003)** Graphing GE and GGE Biplots. *In: Handbook of Formulas and Software for Plant Geneticists and Breeders*. M S Kang (ed.). Food Products Press. New York pp:193-203.
- Cadena J A, A Castillo (2000)** Una comparación de SAS y HARVEY en la estimación de varianza en modelos mixtos. *Agrociencia* 34:57-68.
- Coutiño-Estrada B, V A Vidal-Martínez. (2003)** Estabilidad del rendimiento de grano de híbridos de maíz usando mejores predotores lineales insesgados. *Agrociencia* 37:605-616.
- Crossa J (1990)**. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Crossa J, P N Fox, W H Pfeiffer, S Rajaram, H G Gauch (1991)** AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial. *Theor. Appl. Genet.* 81:27-37.
- Crossa J, P L Cornelius, W Yan (2002)** Biplots of linear- bilinear models for studying crossover genotype x environment. *Crop Sci.* 42:619-633.
- Gabriel K R (1971)** The biplot-graphical display of matrices with applications to principal components analysis. *Biometrika* 58:453-467.
- Gauch H G (1992)** Statistical Analysis of Regional Yield Trials: AMMI Analysis of Factorial Designs. Elsevier Science Publishers, USA. 278 p.
- Goldman I L (1998)** From out of old fields comes all this new corn: An historical perspective on heterosis. *In: Concepts and Breeding of Heterosis in Crop Plants*. K R Lamkey, J E Staub (eds). Madison, Wisconsin. pp:1-12.
- Gollob H F (1968)** A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika* 33:73-115.
- Hallauer A R, W A Russell, K R Lamkey (1988)** Corn breeding. *In: Corn and Corn Improvement*. G F Sprague, J W Dudley (eds). Madison Wisconsin, USA. pp:453-564.
- Kempton R A (1984)** The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *J. Agric. Sci.* 103:123-135.
- Lamkey R L, B Shinicker, T Gocken (1993)** Choice of source population for inbred corn development. *Proc. Ann. Corn and Sorghum. Ind. Res. Conf.* 48:91-103.
- McLean R A, W L Sanders, W W Stroup (1991)** A unified approach to mixed model analysis. *Amer. Stat.* 45:54-65.
- Melchinger, A E, R K Gumber (1998)** Overview of heterosis and heterotic groups in agronomic crops. *In: Concepts and Breeding of Heterosis in Crop Plants*. K R Lamkey, J E Staub (eds). Madison, Wisconsin. pp:29-44.
- Mickelson H R, H Cordova, K V Pixley, M S Bjarnnason (2001)** Heterotic relationships among nine temperate and subtropical maize populations. *Crop Sci.* 41:1012-1020.
- SAS (1996)** SAS/STAT user's guide: 6.11th ed. Vol. 2. SAS Inst. Cary, N. C. 956 p.
- Snedecor G W, W G Cochran (1989)** Statistical methods, eighth edition. Iowa State University, Ames Iowa. 503 p.
- Sprague G F, L A Tatum (1946)** General vs specific combining ability in single crosses of corn. *Agron. J.* 34:923-932.
- Stroup W W (1989a)** Why mixed models?. *In: Applications of Mixed Models in Agriculture and Related Disciplines, Southern Cooperative Series*. Bull. 343. Louisiana Agricultural Experiment Station. Baton Rouge. pp:1-8.
- Stroup W W (1989b)** Predictable functions and prediction space in the mixed model procedure. *In: Applications of Mixed Models in Agriculture and Related Disciplines, Southern Cooperative Series*. Bull. 343. Louisiana Agricultural Experiment Station. Baton Rouge. pp:39-48.
- Williams E J (1952)** The interpretation of interactions in factorial experiments. *Biometrika* 39:556-580.
- Yan W, L A Hunt, Q Sheng, Z Szlavnics (2000)** Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Sci.* 40:597-605.
- Yan W, P L Cornelius, J Crossa, L A Hunt (2001)** Two types of GGE for analyzing multi-environmental trial data. *Crop Sci.* 41:656-663.

Zobel R W (1990) A powerful statistical model for understanding genotype by environment interaction. *In*: Genotype by Environment Interaction and Plant Breeding. M S Kang (ed). Louisiana State University. pp:126-140.

Zobel R W, M J Wright, H G Gauch (1988) Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80:388-393.