

## **Análisis de los patrones de respuesta de grupos germoplásmicos y ambientes, por “biplots” en maíz**

### **Analysis of response patterns of germoplasm groups and environments by biplot technique in maize**

Humberto de León Castillo<sup>1</sup> Alfredo dela Rosa Loera y Daniel Sámano Garduño<sup>1</sup>

#### **Resumen**

Tener información de las relaciones existentes entre los diferentes grupos germoplásmicos, así como de sus áreas de adaptación y su respuesta a la interacción genotipo x ambiente son herramientas esenciales en la toma de decisiones dentro de los diversos programas de mejoramiento. Este trabajo tuvo por objetivos (i) probar que tres grupos germoplásmicos de amplia utilidad en el programa de mejoramiento de la región ecológica del Bajío, exhiben diferente potencial en la variable de mayor interés económico, el rendimiento, (ii) hacer un análisis del comportamiento de cinco ambientes por su capacidad para, representar el área de interés y para discriminar los genotipos en evaluación, y (iii) estudiar los patrones de respuesta de los grupos, los ambientes y su interacción. Para probar la hipótesis de que los grupos germoplásmicos tienen diferente potencial para rendimiento, se efectuó un análisis de varianza (ANVA); la comparación de los ambientes y el estudio de la respuesta a la interacción genotipo ambiente se realizó mediante el empleo de los modelos multiplicativos “Regresión en los Sitios” y “Efectos Principales Aditivos y la Interacción Multiplicativa”. Los resultados demostraron estadísticamente que los grupos y los ambientes difieren en comportamiento para el potencial de rendimiento; los modelos multiplicativos permitieron una clara clasificación de los ambientes y del estudio de la interacción; el grupo germoplásmico de mayor potencial y menos interacción es el Ideotipo; la localidad más eficiente en la discriminación de genotipos fue Celaya.

**Palabras clave:** *Zea mays*, modelos multiplicativos, Instituto Mexicano del Maíz.

#### **Abstract**

To have information, of the existent relationships among the different germoplasm groups as well as of their areas of adaptation and their response to the genotype x environment interaction are essential tools for taking decisions inside the diverse programs of improvement. This work had for objectives (i) to prove that three germoplasm groups of wide utility in the program of improvement of the ecologic region the Bajío, exhibit different potential in the variable of more economic interest, the yield, (ii) to make an analysis of the performance of five environments for their capacity to represent the area of interest and to discriminate against the genotypes in evaluation, and (iii) to study some response patterns of the groups evaluated in five environments and their interaction. In order to prove the hypothesis that the germoplasm groups have different potential average for yield, a variance analysis was made; the comparison of the environments and the study of the response to the interaction environments x genotype were made using the multiplicative models "Regression in the Sites" and "Additive Main Effects and Multiplicative Interaction".

The results demonstrated statistically that the groups and the environment differ in performance for the yield potential; the multiplicative models allowed a clear classification of the environments and of the study of interaction; the germoplasm group of more potential and less interaction is the “Ideotipo”; the most efficient environment in the discrimination of genotypes was Celaya.

**Key words:** Zea mays, multiplicative models, Mexican Institute of the Corn..

## Introducción

El éxito del mejoramiento práctico descansa en gran medida en el conocimiento y el uso correcto del germoplasma disponible, algunos de las principales atributos de los que se debe tener información son, áreas de adaptación, potencial agronómico, conocimiento de la aptitud combinatoria, heterosis con grupos específicos y tipo de acción génica de las variables de mayor importancia económica.

En el programa de mejoramiento del área agroecológica del Bajío del Instituto Mexicano del Maíz “Dr. Mario E. Castro Gil” la clasificación del material genético en grupos germoplásmicos ha dado excelentes resultados en la formación y explotación de patrones heteróticos para la región de trabajo. Como criterio de agrupación se consideró principalmente el origen genético de los materiales, el comportamiento agronómico, similitud fenotípica y se atendió la respuesta de combinación al cruzarse con individuos del mismo grupo, así como la heterosis que muestran al cruzarse con otros grupos.

El término de grupo heterótico se aplica a un conjunto de individuos que exhiben similar habilidad combinatoria y respuesta heterótica al ser cruzados con otros grupos germoplásmicos genéticamente diferentes. Mientras que el término patrón heterótico se refiere a un par específico de grupos heteróticos que al ser cruzados muestran una alta heterosis facilitando el desarrollo de híbridos potenciales (Melchinger y Gumber, 1998).

Los objetivos de este trabajo son, (i) comparar el potencial de rendimiento de tres grupos germoplásmicos, en función al desempeño promedio de cruza simples formadas entre líneas del mismo grupo, (ii) presentar un análisis del comportamiento de cinco ambientes de evaluación en cuanto a su capacidad para representar efectivamente la región del Bajío y para discriminar a los genotipos bajo evaluación, (iii) estudiar algunos patrones de respuesta de los grupos, los ambientes y su interacción, para tener información de su estabilidad y adaptabilidad.

Con la idea de obtener una información estadística más completa sobre el desempeño de los tratamientos, que la que tradicionalmente ofrecen los ANVA Crossa *et al.*, (2000) describen el uso y las ventajas de cinco modelos estadísticos multiplicativos, empleados para el análisis de ensayos de genotipos evaluados en varios ambientes mencionando, que son útiles para estimar patrones de respuesta de

los ambientes y de los genotipos, permiten un claro entendimiento de la interacción genotipo x ambiente (IGA) y logran predicciones más precisas del rendimiento.

Una herramienta, que viene unida a los modelos anteriores, útil para la evaluación visual y la interpretación de los patrones de respuesta de los genotipos, de ambientes y de la IGA es el “biplot” que es una representación gráfica del comportamiento simultaneo de dos variables. Los “biplots”, originalmente propuestos por Gabriel (1971) son útiles para analizar de una manera resumida una larga cantidad de datos por medio de una gráfica.

El modelo de efectos principales aditivos y la interacción multiplicativa (AMMI), según lo cita Gauch (1992) fue originalmente propuesto por Pike y Silverberg (1952) y Williams (1952) en áreas del conocimientos diferentes a la genética agronómica; su aplicación en la agricultura es mucho más reciente, de los reportes pioneros sobresalen por su contenido el de Kempton (1984) y el de Zobel (1988).

El procedimiento AMMI consiste esencialmente en combinar las técnicas del análisis de varianza y el análisis de componentes principales (ACP) en un sólo modelo. Donde el análisis de varianza permite estudiar los efectos principales de genotipos y ambientes, en tanto que la interacción genotipo ambiente (IGA) es tratada de forma multivariada mediante el ACP donde se realiza una reparametrización del modelo de regresión para mejorar la interpretación de la interacción (Zobel, 1988; Gauch, 1992).

El modelo SREG fue propuesto para explorar la respuesta de los genotipos a ambientes específicos; siendo muy similar al AMMI sólo que los efectos principales de los genotipos se mandan al residual para modelarlo de forma multivariada junto con la interacción (Yan *et al.*, 2000). Un merito exclusivo de este modelo es que permite agrupar ambientes con similar desempeño e identificar gráficamente cuál es el genotipo con mayor potencial dentro de cada subgrupo de ambientes. Es decir, agrupa genotipos o ambientes sin interacción cruzada.

## **Metodología Experimental**

### **Material genético**

En el presente trabajo de investigación fueron evaluadas 24, 18 y 26 cruzas simples como muestra de los grupos germoplásmicos denominados: Maíz Enano, Maíz Ideotipo y Maíz Exótico, respectivamente, cuya descripción es la siguiente.

1. Grupo de Maíz Enano: población de plantas braquíticas con perfecta adaptación al área de Bajío, que se caracteriza por soportar altas densidades de siembra, responde positivamente a la aplicación de insumos y tener una gran plasticidad de adaptación y excelente respuesta en combinaciones híbridas. Exhibe madurez diversa por lo que se pueden encontrar familias precoces a intermedias, entrenudos cortos debajo de la mazorca, tendencia a la prolificidad, hojas breves y erectas, y espigas compactas.
2. Grupo Ideotipo: población constituida por plantas con excelentes atributos agronómicos, que se origino de la transformación de plantas enanas a normales

mediante un programa continuo de retrocruzas, donde el donador fue una población de amplia y de selecta base genética con adaptación al área de El Bajío. Las principales características de tal población son: individuos de altura intermedia, pocas

hojas cortas y erectas, espiga compacta, madurez intermedia, alto índice de cosecha y perfecta adaptación a regiones con altitudes de 1000 a 2000 msnm.

3. Grupo Exótico: población constituida mediante la recombinación de líneas derivadas de híbridos comerciales a los que previamente se les seleccionó por poseer altos efectos de aptitud combinatoria general.

Los cruzamientos fueron realizados entre líneas del mismo grupo, en la estación experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicada en Tepalcingo, Morelos durante el ciclo Otoño-Invierno 2001-2002. Originándose los 68 híbridos simples experimentales.

Las 68 cruzas simples (representantes de los tres grupos germoplásmicos) fueron evaluadas en cinco localidades; tres durante el ciclo Primavera–Verano 2002: Celaya, Gto. (A1), Santa Ana Pacueco, Gto. (A2) y Gral. Cepeda, Coah. (A3); y dos más durante el 2003: Celaya, Gto. (A4) y El Prado, municipio de Galeana N.L. (5). Bajo un diseño de bloques al azar con dos repeticiones por ambiente. 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 el presente estudio es el rendimiento de mazorca en  $t\ ha^{-1}$  al 15.5 % de humedad, por ser la variable de mayor importancia económica.

### Análisis de varianza

Para la comparación de los grupos germoplásmicos y de las cruzas simples experimentales se efectuó, con el paquete computacional SAS (SAS, 1996), un análisis de varianza de bloques al azar combinado.

### Modelos estadísticos multiplicativos

Para modelar la respuesta de los ambientes, los genotipos y la IGA se empleó: El AMMI (Vargas y Crossa 2000) cuyo modelo se presenta a continuación:

$$Y_{ij} = \bar{y} + g_i + e_j + \sum_{k=1}^n \tilde{y}_k \tilde{y}_{ik} \tilde{y}_{jk} + R_{ij}$$

Mientras que para analizar la respuesta de los patrones heteróticos a ambientes específicos el modelo con que se trabajó fue el de SREG (Crossa *et al.*, 2002) cuya descripción se presenta a continuación:

$$Y_{ij} = \bar{y} + e_j + \sum_{k=1}^n \tilde{y}_k \tilde{y}_{ik} \tilde{y}_{jk} + R_{ij}$$

donde:  $Y_{ij}$  = rendimiento del  $i$ -ésimo genotipo en el  $j$ -ésimo ambiente;  $\bar{y}$  = Media general;  $g_i$  = Efecto del  $i$ -ésimo genotipo;  $e_j$  = Efecto del  $j$ -ésimo ambiente;  $\tilde{y}_k$  = Raíz cuadrada del vector característico del  $k$ -ésimo eje del ACP;  $\tilde{y}_{ik}$  = Calificación del ACP para el  $k$ -ésimo

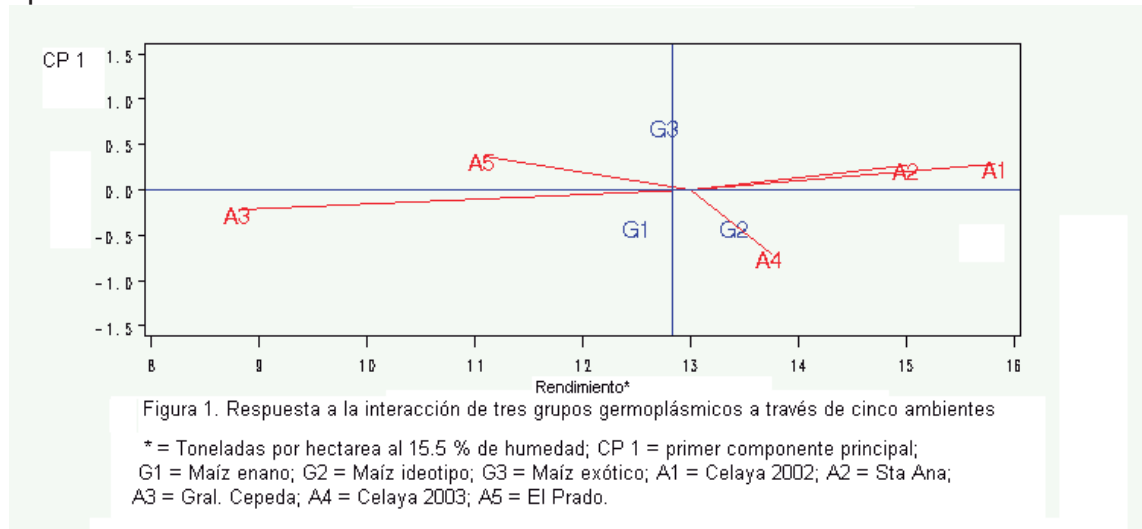
eje del  $i$ -ésimo genotipo;  $\tilde{y}_{jk}$  = Calificación del ACP para el  $k$ -ésimo eje del  $j$ -ésimo ambiente;  $R_{ij}$  = Residual del modelo con  $\sim$  DNI  $(0, \frac{\sigma^2}{r})$ .

El paquete estadístico empleado para procesar ambos análisis multiplicativos fue el propuesto por Burgueño *et al.*, (2003) denominado Graphing GE and GGE Biplots.

## Resultados Y Discusión

Los resultados generados por el análisis de varianza en la comparación de los grupos germoplásmicos indican que hay diferencias significativas entre ellos ( $P = .0352$ ); entre localidades también reporta diferencias estadísticas ( $P > .01$ ), la interacción no mostró diferencias estadísticas (datos no incluidos). Las medias de rendimiento en mazorca al 15.5 % de humedad en  $t\ ha^{-1}$  a través de ambientes son de 12.452, 13.450 y 12.774 para los grupos heteróticos de maíz enano, ideotipo y exótico respectivamente.

Esta información creó la pauta para analizar los patrones de respuesta de los grupos de los ambientes y de la interacción. Mismos que se resumen en tres "biplots" que serán discutidos más adelante. En la Figura 1 se presentan los resultados del modelo más simple y de mayor interpretación biológica, aquí el eje  $x$  corresponde al rendimiento y el eje  $y$  representa el primer componente principal, que en este trabajo aporta el 67% de la varianza total de la IGA.



Se puede observar que los grupos germoplásmicos de maíz enano e ideotipo (G1 y G2), por su posición en relación al componente principal tienen una tendencia de interacción negativa similar y por su ubicación en base al eje  $x$ , el que más potencial de rendimiento muestra es el grupo ideotipo, quien por el grado de asociación con el ambiente de Celaya 2003 se infiere que es en este ambiente en donde expresó su máximo potencial de rendimiento; por su parte el grupo de maíz exótico muestra una interacción positiva; y entre los tres no se observa tendencia alguna de agrupación.

En lo que a ambientes se refiere, se puede mencionar que aquellos que exhiben entre ellos un ángulo menor a los  $90^\circ$  tienen la cualidad de clasificar de una manera semejante a los genotipos, caso que se presentó en los ambientes 1 y 2 y 5 y 3 por lo

que en un momento determinado se puede eliminar uno de la pareja sin perder precisión en los resultados; los que forman un ángulo cercano a 90° no guardan relación en la forma de ordenar los genotipos, mientras los que tienen un ángulo cercano a los 180° tienden a ordenar de manera inversa los genotipos evaluados, dificultando la selección por ser tan contrastantes, caso que se presenta en los ambientes 1, 2 y 4 contra el ambiente 3 y 5.

Por la longitud de los vectores los ambientes que mejor discriminan a los genotipos en evaluación son el ambiente 1 correspondiente a Celaya 2002 y el ambiente 3 representado por la localidad de Gral, Cepeda Coah. Todo lo anterior es de acuerdo a lo explicado por Kempton (1984) y por Yan *et al.*, (2000).

En la Figura 2. Se presenta el segundo "biplot" en el que se consideran los efectos de los primeros dos componentes principales, que en este caso particular representan el 100 % de la variación de la interacción y específicamente este "biplot" se recomienda para interpretar los efectos de la IGA y el poder discriminativo de los ambientes.

En resumen esta gráfica sugiere que los ambientes que tienden a jerarquizar de manera similar a los grupos germoplásmicos son las parejas de ambientes 1 con 2 y 3 con 4, lo que indica que se puede prescindir de uno por pareja sin perder precisión en los resultados.

Algo sobresaliente de este "biplot" es que el ambiente 1 y el ambiente 4 correspondientes ambos a Celaya, pero en evaluaciones del 2002 y 2003 respectivamente muestran una clara tendencia (por el ángulo que forman) a ordenar de manera contrastante a los grupos germoplásmicos, de ahí la importancia de tener evaluaciones de varios ciclos de un mismo lugar antes de tomar cualquier decisión de interés. El ambiente con mas poder de discriminación es Celaya 2004 (A4), por lo largo de su vector.

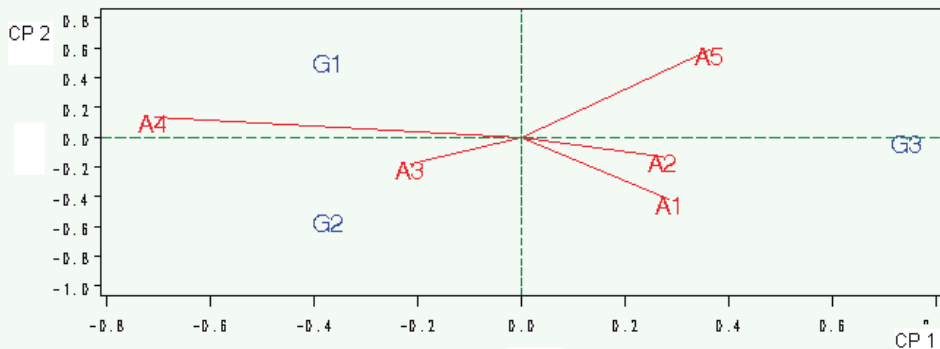


Figura 2. Patrón de respuesta a la interacción genotipo ambiente de tres grupos germoplásmicos a través de cinco ambientes.  
CP 1 = Primer componente principal; CP 2 = Segundo componente principal; G1 = Maíz enano; G2 = Maíz ideotipo; G3 = Maíz exótico; A1 = Celaya 2002; A2 = Sta. Ana; A3 = Gral, Cepeda; A4 = Celaya 2003; A5 = El Prado.



Para identificar el conjunto de ambientes donde los grupos germoplásmicos muestran una adaptación similar se empleó la técnica de regresión en los sitios ( “biplot” tercero) donde Yan *et al.*, (2000) describen que se debe formar un polígono al unir los puntos de los vectores de los grupos germoplásmicos más alejados del origen, posteriormente se traza una línea perpendicular por cada lado del polígono con relación al origen, ocasionando que los ambientes y grupos sean separados en subgrupos, donde el grupo germoplásmico que está en el vértice de cada sector es el que tiene mejor desempeño en los ambientes incluidos.

En la Figura 3 se observa que en un sector formado en el polígono quedan incluidos cuatro de los cinco ambientes y en la esquina de ese sector se observa al G2 correspondiente al grupo de maíz Ideotipo lo que indica que es el grupo germoplásmico que mejor desempeño tiene en esos ambientes, en otro sector queda el A5 asociado al grupo germoplásmico exótico asimismo, se puede observar en ese biplot que el G2 muestra el vector de mayor longitud , lo que según Yan *et al.* (2000) está directamente correlacionado con el potencial de rendimiento y por su cercanía al origen del segundo eje se le considera el más estable; por lo tanto es el grupo germoplásmico más cercano a lo ideal para continuar trabajando.

En esta figura se puede observar que de las localidades que en éste trabajo se consideraron representativas del mega-ambiente Bajío, la única que ligeramente muestra interacción cruzada, por quedar en un sector diferente al resto es la localidad de El Prado (A5). Es pertinente aclarar que sin la ayuda de éstos gráficos es difícil tener una idea de los patrones de respuesta de los grupos a través de ambientes

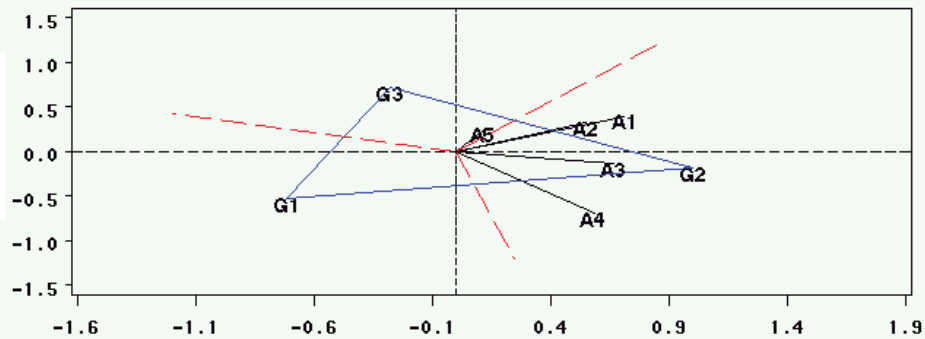


Figura 3. Patrón de respuesta a la adaptación de tres grupos germoplásmicos.  
 CP 1 = Primer componente principal; CP 2 = Segundo componente principal; G1 = Maíz enano;  
 G2 = Maíz ideotipo; G3 = Maíz exótico; A1 = Celaya 2002; A2 = Sta Ana; A3 = Gral Cepeda;  
 A4 = Celaya 2003; A5 = El Prado.

## Conclusiones

El grupo germoplásmico de mayor potencial y menos interacción es el Ideotipo; la localidad más eficiente en la discriminación de genotipos es Celaya; con la utilización de las gráficas “biplot” se genera una óptima interpretación de los efectos propios del modelo, ya que se va más allá de la simple información contenida en tablas y es posible establecer importantes relaciones entre los efectos.

## Literatura Citada

- Burgueño, J., J. Crossa, M. Vargas. 2003. Graphing GE and GGE Biplots. *In*: Kang M S (ed.) Handbook of formulas and software for plant geneticists and breeders. Food products Press. New York pp:193-203.
- Crossa, J. 1990. Statistical analyses of multilocations trials. *Adv. Agron.* 44: 55-85.
- 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.
- Kempton, R. A. 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *J. Agric. Sci.* 103:123-135.
- Melchinger, A. E., R. K. Gumber. 1998. Overview of heterosis and heterotic groups in agronomic crops. *In*: Lamkey K R, J E Staub (eds). Concepts and breeding of heterosis in crop plants. 1998. Madison, Wisconsin. pp 29-44.
- SAS. 1996. SAS/STAT user's guide: 6.11<sup>th</sup> ed. Vol. 2. SAS Inst. Cary, N. C. 956 p.
- Vargas, M., and J. Crossa. 2000. The AMMI analysis and the graph of the biplot in SAS. Available on: <<http://www.Cimmyt.org/biometrics>> Access: on 2000.
- Yan W, L A Hunt, Q Sheng, and Z Szlavnic. 2000. Cultivars evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Sci.* 40:597-605.



