

## IDENTIFICACIÓN DE VARIEDADES DE MAÍZ SOBRESALIENTES CONSIDERANDO EL MODELO AMMI Y LOS ÍNDICES DE ESKRIDGE\*

### IDENTIFICATION OF OUTSTANDING MAIZE VARIETIES CONSIDERING THE AMMI MODEL AND THE ESKRIDGE'S APPROACH

Andrés González Huerta<sup>1§</sup>, Jaime Sahagún Castellanos<sup>2</sup>, Luis Miguel Vázquez García<sup>1</sup>, Juan Enrique Rodríguez Pérez<sup>2</sup>, Delfina de Jesús Pérez López<sup>1</sup>, Aurelio Domínguez López<sup>1</sup>, Omar Franco Mora<sup>1</sup> y Artemio Balbuena Melgarejo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas, Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. A. P. 435. Tel. 01 722 2965518 Ext. 148, (lmvazquezg@uaemex.mx), (djperel@uaemex.mx), (adominguezl@uaemex.mx), (ofrancom@uaemex.mx), (balmelart@yahoo.com.mx). <sup>2</sup>Departamento de Fitotecnia, Programa Universitario de Investigación y Servicios en Olericultura, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera México- Texcoco, C. P. 56230, Chapingo, Estado de México, México. Tel. 01 595 95 21500 Ext. 6185 ó 6186, (jsahagun@correo.chapingo.mx), (erodriguezx@yahoo.com.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: agonzalezh@uaemex.mx.

## RESUMEN

El estudio se realizó en 2004, en Metepec, El Cerrillo Piedras Blancas (dos fechas de siembra) y Jocotitlán, localidades situadas en el Valle Toluca -Atlacomulco, Estado de México; el objetivo principal fue identificar variedades de maíz (*Zea mays* L.) de alto rendimiento con base en el modelo AMMI, cuatro criterios de Eskridge y el análisis genotipo x índice de estabilidad. En cada localidad, se sembraron 25 variedades en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El análisis de los datos a través de los ambientes se hizo como una serie de experimentos. Con el modelo AMMI se detectaron diferencias significativas ( $p<0.01$ ) para ambientes, genotipos, interacción GxA y para el componente principal 1; sólo 2% de la suma de cuadrados quedó alojada en el residuo del modelo. La variedad Ixtlahuaca (testigo) superó en 2.3 t ha<sup>-1</sup> a Palomero Toluqueño y en 2.0 y 1.48 t ha<sup>-1</sup> a los Cacahuacintles de menor y mayor rendimiento, respectivamente. Chalqueño, ETA 13, Cóndor, H-33, H-40, H-44 y H-90E superaron al testigo entre 1.0 y 2.25 t ha<sup>-1</sup>. El modelo AMMI, los cuatro criterios de Eskridge, y la metodología genotipo x índice de estabilidad identificaron a Chalqueño, H-33, H-40, HIT-3, San Lucas y VS-46E como estables, y sólo las tres primeras

tuvieron mayor rendimiento ( $p<0.01$ ) que el testigo y que la media general; las variedades Palomero Toluqueño y los Cacahuacintles 4 y 5, con menor rendimiento ( $p<0.01$ ) que el testigo y que la media general, fueron inestables.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., maíces de Valles Altos, métodos multivariados, rendimiento y estabilidad.

## ABSTRACT

This study was carried out in 2004 at Metepec, El Cerrillo Piedras Blancas (two sowing dates), and Jocotitlán, towns located in the Toluca-Atlacomulco Valley, in the State of Mexico; the main objective was to identify high yielding maize (*Zea mays* L.) genotypes by using the additive main effects and multiplicative interaction analysis model (AMMI), four Eskridge's criteria, and the genotype by stability index analysis. At each location, twenty-five varieties were sown in a randomized complete block design with four replications. The combined analysis of variance

\* Recibido: Octubre, 2008  
Aceptado: Junio, 2009

was computed for this series of experiments over locations. The analysis with the AMMI model show that environment, genotype, genotype by environment interaction, and the first principal component in the PCA analysis were highly significant ( $p < 0.01$ ). Only 2% of total sum of squares of the AMMI model was assigned to the model's residual. The Ixtlahuaca variety (Check) outperformed Palomero Toluqueño in  $2.3 \text{ t ha}^{-1}$ , and outyielded the lowest and highest Cacahuacintle yielders by 2.3 and  $1.48 \text{ t ha}^{-1}$ , respectively. Chalqueño, ETA 13, Cóndor, H-33, H-40, H-44, and H-90E outperformed the check variety from 1.0 to  $2.25 \text{ t ha}^{-1}$ . The AMMI model, the four Eskridge's criteria, and the genotype by stability index analysis identified Chalqueño, H-33, H-40, HIT-3, San Lucas, and VS-46E as stable varieties, and only the first three outyielded ( $p < 0.01$ ) the check variety and the overall mean; Palomero Toluqueño and Cacahuacintles 4 and 5 were classified as unstable varieties and show a yield significantly lower ( $p < 0.01$ ) than the check and the overall mean.

**Key words:** *Zea mays* L., highland maize, grain yield and stability, multivariate analysis.

## INTRODUCCIÓN

En la identificación de variedades estables se han utilizado métodos paramétricos univariados como los de Finlay y Wilkinson (1963), de Eberhart y Russell (1966), de Shukla (1972) y de Francis y Kannenberg (1978), entre otros. Estos métodos requieren pocos cálculos y sus parámetros son fáciles de interpretar biológicamente, pero tienen poca utilidad cuando la respuesta de los genotipos a los ambientes no es lineal; además, tienen el inconveniente de que la clasificación de estabilidad sólo se aplica a los genotipos y a los ambientes evaluados (Crossa, 1990). Adicionalmente, en estos métodos no se indicó cómo desarrollar un índice que considere tanto al rendimiento como a la estabilidad, especialmente si éste se relaciona con una probabilidad pequeña de elegir una variedad que produzca un rendimiento mínimo. Un enfoque con estas características fue desarrollado por Telser (1955) y aplicado a la agricultura por Eskridge (1990, 1991), éste podría ser útil al fitomejorador y al productor de semilla, debido a que usa información de los cuatro métodos citados previamente. Los agricultores que siembran variedades criollas o híbridos en condiciones de secano, con un paquete tecnológico de capital limitado, en diferentes localidades de un mismo año o en localidades con gran variación ambiental de un año

a otro también podrían beneficiarse con los resultados de este enfoque para incrementar sus ingresos (Crossa, 1990; Eskridge, 1990, 1991).

La identificación de variedades sobresalientes también puede efectuarse desde una perspectiva multivariada con las técnicas de componentes principales, el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) y el análisis de conglomerados, entre otros. El modelo AMMI relaciona los efectos de los ambientes y de genotipos (efectos principales aditivos) con un análisis de varianza y la interacción genotipo-ambiente, IGA (efectos no aditivos) se evalúa con un análisis de componentes principales. El modelo permite diagnosticar si los análisis de varianza, de componentes principales, de regresión o de conglomerados son variantes del AMMI; también es útil para interpretar gráficamente la respuesta de los genotipos, de los ambientes y de la IGA, y es eficiente aún con un número pequeño de repeticiones, lo que permite reducir los costos o incluir un mayor número de variedades en el ensayo (Zobel *et al.*, 1988; Crossa, 1990; Gauch, 2006).

En los Valles Altos de México, la heterogeneidad ambiental como son: aislamiento geográfico, recombinación entre criollos diferentes y selección que los agricultores han realizado para rendimiento o para usos culinarios específicos han contribuido a la conservación *in situ* del material genético, al incremento de su diversidad, y al mejoramiento genético. En el Valle Toluca-Atlacomulco, Estado de México, predominan los criollos de grano semidentado (como los híbridos y criollos diferentes a Palomero Toluqueño y Cacahuacintle) y en una proporción muy pequeña los de grano reventador y harinoso (Wellhausen *et al.*, 1951). En este Valle se siembran  $250\,000 \text{ ha}$  en condiciones de secano; 87 % de los agricultores usan semilla criolla (Herrera *et al.*, 2002), y el rendimiento de grano varía de  $2.5$  a  $6.5 \text{ t ha}^{-1}$  (Niño *et al.*, 1998; Nava *et al.*, 2000), pero se han obtenido más de  $8.0 \text{ t ha}^{-1}$  con híbridos sembrados en riego o humedad residual (Eagles y Lothrop, 1994; Vasal *et al.*, 1995; González *et al.*, 2007). En las últimas dos décadas se liberaron híbridos que podrían superar a los criollos sembrados en el Valle Toluca - Atlacomulco. Como la mayoría de los criollos e híbridos considerados en el presente estudio no están documentados en la literatura especializada, se emprendió este estudio con los siguientes objetivos: 1) identificar variedades de maíz con mayor rendimiento de grano que el cultivar Ixtlahuaca a partir de técnicas univariadas y con base en el modelo AMMI y los índices de Eskridge, 2) determinar la relación que existe entre el rendimiento y los métodos de Eskridge desde una

perspectiva multivariada y, 3) comparar las metodologías aplicadas en la identificación de genotipos sobresalientes para relacionar el rendimiento y los métodos de Eskridge con los conceptos de estabilidad estática y dinámica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Este estudio se realizó en el ciclo primavera - verano de 2004 en Metepec, El Cerrillo Piedras Blancas [fechas 1 (punta de riego) y 2 (secano)] y Jocotitlán, localidades situadas en el Valle Toluca - Atlacomulco, Estado de México. Metepec está localizada a 19° 13' de latitud norte, 99° 35' de longitud oeste, a una altitud de 2 606 m, su clima es templado húmedo, presenta suelo andosol y una precipitación media anual (PMA) de 980 mm. El Cerrillo está localizada a 19° 17' de latitud norte, 99° 39' de longitud oeste, a una altitud de 2 640 m, presenta clima templado húmedo, suelo vertisol y una PMA de 780 mm. Jocotitlán se sitúa a 19° 42' de latitud norte, 99° 43' de longitud oeste, a una altitud de 2 553 m, clima templado seco, presenta suelo planosol molico y la PMA es de 669 mm (González *et al.*, 2007).

### Material genético, diseño y parcela experimental

Los 25 tratamientos fueron 12 criollos de las razas Cónico (Ixtlahuaca y San Lucas), Cacahuacintle (Cacahuacintles 1 a 6), Chalqueño (Chalqueño, ETA 13 y Negro) y Palomero Toluqueño (Wellhausen *et al.*, 1951; González *et al.*, 2007) y 13 híbridos de Valles Altos (AS-721, AS-722, AS-820, Cándor, Gavilán, H-33, H-40, H-44, H-90E, HIT-3, HIT-7, VS-46E y Z-60). Los híbridos trilineales HIT-3 y HIT-7 están formados por tres y dos líneas del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y comparten la misma hembra, mientras que H-33, H-40, H-44 y H-90E están formados con líneas de Cónico-Chalqueño (González *et al.*, 2007). H-33 y H-40 están documentados en Gámez *et al.* (1996) y Velásquez *et al.* (2005), mientras que Ixtlahuaca (testigo) y ETA 13 lo están en Niño *et al.* (1998); Nava *et al.* (2000) también evaluaron al cultivar Ixtlahuaca. Debido a que los terrenos donde se establecieron los cuatro experimentos eran planos y aparentemente homogéneos, los 25 tratamientos fueron distribuidos en tres bloques por repetición (conteniendo cada uno 10, 10 y 5 genotipos, respectivamente, sin dejar hileras sin sembrar entre una

repetición y otra) bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por ambiente. La parcela constó de tres surcos de 6.0 x 0.80 m; cada surco tuvo 11 matas distanciadas a 0.60 m y en cada una de éstas se establecieron tres plantas. La hilera central fue la unidad experimental útil (4.8 m<sup>2</sup>).

### Manejo experimental

La preparación del suelo con tractor consistió en un barbecho, una cruz y una rastra. Antes del surcado se fertilizó con la dosis 70N-80P-30K. En la región, la siembra se realiza comúnmente con tracción mecánica y animal y puede ser equidistante para la primera modalidad o alternada, depositando dos granos primero y tres después, para manejar una densidad de población entre 50 000 y 62 500 plantas por ha<sup>-1</sup>. La siembra manual se hizo el 7 (Jocotitlán), el 12 (fecha 1, El Cerrillo), el 14 (Metepec) y el 26 de abril (fecha 2, El Cerrillo) de 2004; en cada experimento se depositó cuatro semillas por mata y cuando las plántulas tenían 20 cm se aclaró a tres plantas por mata (62 500 plantas ha<sup>-1</sup>). Con la segunda labor cultural se incorporaron 70 unidades de N y se aplicó atrazina y 2,4-D amina, en dosis de 1.5 kg y 1.5 L ha<sup>-1</sup>, respectivamente; ambos disueltos en 200 L de agua. El control de la maleza fue mecánico, manual y químico (hasta los 90 días de la siembra). La cosecha se efectuó después que los genotipos alcanzaron la madurez fisiológica.

### Registro de datos y análisis estadístico

Con la producción de grano de la parcela útil (kg) se calculó el rendimiento por hectárea (RG, en t) y a éste se le aplicó el análisis de varianza con los siguientes contrastes: Palomero Toluqueño (PT) *versus* Cacahuacintle (CC), PT *versus* Ixtlahuaca, San Lucas y Negro (C), PT *versus* Chalqueño y ETA 13 (CH), CC *versus* C, CC *versus* CH, C *versus* CH, criollos *versus* híbridos, y H-90E *versus* ETA 13. El análisis de varianza combinado y las pruebas de hipótesis se realizaron como lo indica Sahagún (1998). Para determinar si la producción del testigo era diferente de la de cada variedad se aplicó la prueba de Dunnett al 1% (Montgomery, 1991).

Al rendimiento de grano también se aplicaron las metodologías multivariadas del AMMI (Zobel *et al.*, 1988; Vargas y Crossa, 2000) y de genotipo x método de Eskridge (Sánchez, 1995; González *et al.*, 2007). Los índices (Cuadros 1 y 2) de Finlay y Wilkinson (1963),

de Eberhart y Russell (1966), de Shukla (1972) y de Francis y Kannenberg (1978), fueron empleados para calcular los cuatro criterios de estabilidad (Cuadro 4) de Eskridge (1991). Para la identificación de variedades

sobresalientes se consideraron valores mayores que  $3.5 \text{ t ha}^{-1}$ , empleando un nivel de significancia de 1% y con  $Z_{1-\alpha}$  como el percentil  $1-\alpha$  de la distribución normal estándar (Cuadro 1). Una variedad es estable si su índice es mayor que  $Z_{1-\alpha}$ .

**Cuadro 1. Criterios de estabilidad de Telser (1955) empleados por Eskridge (1991) para identificar variedades estables cuando se considera una probabilidad pequeña ( $Z_{0.99}$ ) de obtener un valor inferior a d, constante igual a un rendimiento mínimo.**

Método de estabilidad	Criterios de estabilidad de Telser	Abreviatura
Finlay y Wilkinson (1963)	$(\bar{Y}_{i.} - d) / ((b_i - 1)^2 S^2_{\bar{Y}} (1 - (1/q)))^{1/2} \geq Z_{1-\alpha}$	Método 3 (M3)
Eberhart y Russell (1966)	$(\bar{Y}_{i.} - d) / ((b_i - 1)^2 S^2_{\bar{Y}} (1 - (1/q)) + S^2_{d_i})^{1/2} \geq Z_{1-\alpha}$	Método 4 (M4)
Shukla (1972)	$(\bar{Y}_{i.} - d) / \sigma_i \geq Z_{1-\alpha}$	Método 2 (M2)
Francis y Kennenberg (1978)	$(\bar{Y}_{i.} - d) / S_i \geq Z_{1-\alpha}$	Método 1 (M1)

$Y_{ij}$  es el rendimiento de grano de la  $i$ -ésima variedad en el  $j$ -ésimo ambiente y, donde,

$$i = 1, 2, \dots, p \text{ y } j = 1, 2, \dots, q. \text{ Así, } \bar{Y}_{i.} = \sum_j Y_{ij}/q$$

$$\bar{Y}_{.j} = \sum_i Y_{ij}/p, \bar{Y}_{..} = \sum_i \sum_j Y_{ij}/pq,$$

$$S^2_{\bar{Y}} = \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{.j})^2 / (q - 1)$$

$$\sigma_i^2 = [p / ((p - 2)(q - 1))] \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{.j} + \bar{Y}_{..})^2 - SC$$

(GE) / [(p - 1)(p - 2)(q - 1)],

$$SC(GE) = \sum_i \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{.j} + \bar{Y}_{..})^2,$$

$$b_i = \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})(\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..}) / \sum_j (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2,$$

$$S^2_{\bar{Y}} = \sum_j (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2 / (q - 1),$$

$$S^2_{d_i} = [1 / (q - 2)] [\sum_j (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 - b_i^2 \sum_j (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2]$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Modelo AMMI

Las diferencias significativas ( $p < 0.01$ ) entre ambientes (Cuadro 2) que se observaron en el análisis de varianza

combinado reflejan condiciones heterogéneas asociadas a precipitación pluvial y suelo, principalmente. Niño *et al.* (1998) y González *et al.* (2007) comentaron que en Metepec predominan los suelos andosol, y en El Cerrillo y Jicotitlán el vertisol y el planosol mólico, respectivamente. La precipitación media anual para las tres localidades, en este mismo orden, es de 980, 790 y 669 mm.

Las diferencias significativas ( $p < 0.01$ ) que se observaron en el rendimiento de los 25 tratamientos (Cuadro 2) indican que existen diferencias entre criollos y híbridos. Wellhausen *et al.* (1951) destacaron que Palomero Toluqueño y Cacahuacintle son de grano reventador o harinoso, respectivamente, por lo que su rendimiento es inferior al de otros genotipos de grano semidentado. Estas diferencias y las detectadas en los contrastes criollos *versus* híbridos y H-90E *versus* ETA 13, deben estar relacionadas con el tipo de material genético; en los criollos se explotan los efectos génicos aditivos por medio de la selección, generalmente en ambientes desfavorables y capital limitado, mientras que en los híbridos se explotan los efectos de dominancia y epistasia por medio de la hibridación, comúnmente en siembras de riego o punta de riego y capital ilimitado. Además, los criollos pertenecen a las cuatro razas descritas para esta región por Wellhausen *et al.* (1951), mientras que algunos de los híbridos están formados con líneas de Cónico-Chalqueño y de razas de Valles Altos de otros países (González *et al.*, 2007). Herrera *et al.* (2002), Romero *et al.* (2002), Arellano *et al.* (2003) y Herrera *et al.* (2004), también detectaron diferencias significativas entre variedades de origen genético y geográfico diferente.

**Cuadro 2. Análisis de varianza del modelo AMMI para 25 variedades de maíz evaluadas en 2004 en cuatro ambientes del Valle Toluca-Atlacomulco, Estado de México.**

Fuente de variación	G. L.	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F (calculada)	(%) del modelo <sup>¶</sup> y de IGA <sup>†</sup>
Ambientes (A)	3	586.32	195.44	189.74**	45.1 <sup>¶</sup>
Repeticiones / ambientes	12	12.41	1.03	1.53 ns	
Variedades (G)	24	629.13	26.21	22.40**	48.4 <sup>¶</sup>
Palomero Toluqueño (PT) vs Cacahuacintles 1,2,3,4,5,6 (CC)	1	5.94	5.94	8.81**	
PT vs Ixtlahuaca, San Lucas y Negro Carioca (C)	1	83.84	83.84	124.34**	
PT vs Chalqueño y ETA 13 (CH)	1	137.85	137.85	204.44**	
CC vs C	1	126.08	126.08	186.98**	
CC vs CH	1	206.97	206.97	306.94**	
C vs CH	1	17.38	17.38	25.78**	
Criollos vs híbridos	1	171.15	171.15	253.82**	
H-90 vs variedad ETA 13	1	5.12	5.12	7.59**	
Interacción GxA (IGA)	72	84.75	1.17	1.75**	6.5 <sup>¶</sup>
Componente principal 1	26	58.87	2.26	3.35**	69.4 <sup>†</sup>
Componente principal 2	24	15.61	0.65	0.96ns	18.4 <sup>†</sup>
Componente principal 3	22	10.27	0.46	0.69ns	12.2 <sup>†</sup>
Error experimental combinado	288	194.20	0.67		

ns= no significativo ( $p>0.05$ ); \*\*= significativo ( $p<0.01$ ); <sup>¶</sup> modelo= ambientes, genotipos e IGA; <sup>†</sup> contribución a la suma de cuadrados de la IGA de cada componente principal.

La IGA significativa ( $p<0.01$ ) indica que al menos uno de los genotipos evaluados tuvo mejor adaptación a un ambiente específico (Cuadro 2). Crossa (1990), Márquez (1992) y Rodríguez *et al.* (2002) destacaron que la IGA significativa causa confusión en la estimación de parámetros genéticos, reduce el progreso de la selección y limita la posibilidad de elegir genotipos superiores; la IGA, por lo tanto, obliga a la ejecución de técnicas como el modelo AMMI (Zobel *et al.*, 1988), los criterios de estabilidad de Eskridge (1990; 1991), y el análisis genotipo x índice (Sánchez, 1995), para identificar variedades superiores.

El análisis AMMI explicó 98% de la suma de cuadrados del modelo; los ambientes (A), los genotipos (G) y la interacción GxA contribuyeron con 45.1, 48.4 y 6.5%, respectivamente (Cuadro 2); este modelo permitió la diferenciación confiable de los efectos principales aditivos (A y G en el eje X) y no aditivos (IGA en el eje Y). En otros estudios se detectó que los efectos entre ambientes fueron mayores que los de la IGA y que los genotipos tuvieron la menor contribución a la suma de cuadrados del modelo (Gauch, 2006). En investigaciones previas se observaron diferencias significativas ( $p<0.01$ ) entre ambientes, entre genotipos, en la IGA y en la CP1; la contribución de esta última a la IGA varió de 54 al 63%,

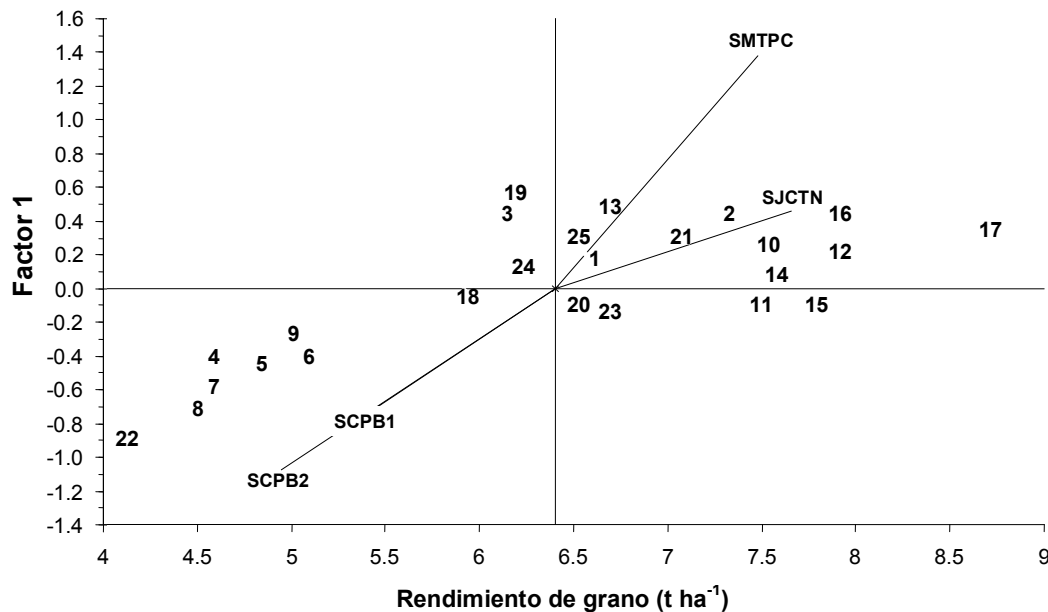
por lo que los autores concluyeron que esta metodología fue eficiente para explicar los efectos aditivos y no aditivos asociados a la estructura de tratamientos representados en el biplot, cuando asignaron al rendimiento al eje X y a la CP1 al eje Y (Crossa *et al.*, 1990; Castañón *et al.*, 2000; De León *et al.*, 2005).

Los cuatro ambientes que se emplearon para la evaluación de los genotipos formaron dos grupos: el primero agrupó a Metepec y Jocotitlán, con medias de 7.65 y 7.49 t ha<sup>-1</sup> y el segundo a El Cerrillo en ambas fechas de siembra (5.39 y 4.94 t ha<sup>-1</sup>). Sahagún (1992) comentó que uno de los principales problemas que enfrenta el fitomejorador es el desarrollo de cultivares superiores en tiempo y espacio; la heterocigocidad y la heterogeneidad de los genotipos de maíz de Valles Altos de México podrían ser mecanismos importantes para obtener estabilidad fenotípica; la primera, asociada a híbridos de líneas homocigóticas o genotipos con estructura genética similar, sugiere estar asociada con el concepto de estabilidad dinámica o agronómica (mayor adaptabilidad), mientras que la segunda, relacionada con criollos de amplia base genética o genotipos con estructura genética similar, podría estar relacionada con el concepto de estabilidad estática o dinámica (mayor adaptación).



En el método AMMI (Figura 1; Cuadro 4) se detectaron cuatro grupos de genotipos: en el grupo 1 se identificó a Palomero Toluqueño (22), la variedad de menor rendimiento; en el grupo 2 se clasificó a los seis Cacahuacintles (genotipos 4 a 9, entre 4.47 y 5.08 t ha<sup>-1</sup>); en el grupo 3 se

agruparon Ixtlahuaca (20), San Lucas (23), Negro (21), HIT-3 (18), HIT-7 (19), AS-721 (1), AS-722 (2), AS-820 (3), Gavilán (13), VS-46E (24) y Z-60 (25); el grupo 4 se formó con Chalqueño (11), ETA 13 (12), Cóndor (10), H-33 (14), H-40 (15), H-44 (16) y H-90E (17).



**Figura 1. Representación del rendimiento de grano y de la componente principal 1 de acuerdo con el análisis AMMI. El número que identifica a cada variedad es el que se especifica en el Cuadro 4; SCPB1 y SCPB2= El Cerrillo Piedras Blancas en las fechas de siembra 1 y 2, SMTPC= Metepec, y SJCTN= Jocotitlán.**

La clasificación de genotipos que se hizo con el modelo AMMI, con los contrastes del análisis de varianza y con la prueba de Dunnett ( $p < 0.01$ ) fue similar. Estos resultados están relacionados con el porcentaje de variación explicado por el modelo; la IGA sólo contribuyó con 6.5% de la suma de cuadrados totales (Cuadro 2), por lo que la agrupación de los 25 genotipos se hizo considerando principalmente los efectos principales aditivos (ambientes y genotipos). Los rendimientos de grano obtenidos en este estudio se consideran aceptables, ya que se encuentran en el intervalo proporcionado por Niño *et al.* (1998), Nava *et al.* (2000) y Nava y Mejía (2002), que fue de 2.5 a 6.5 t ha<sup>-1</sup> para variedades no mejoradas y por Eagles y Lothrop (1994) y Vasal *et al.* (1995), que fue de más de 8.0 t ha<sup>-1</sup> para híbridos sembrados en punta de riego o humedad residual. La comparación criollos *versus* híbridos reflejó un incremento en la producción a favor de los híbridos de 22% (1.25 t ha<sup>-1</sup>).

Esta superioridad de los híbridos se detectó nuevamente en el contraste H-90E *versus* ETA 13 (Cuadro 2), la diferencia fue de 0.81 t ha<sup>-1</sup> (10.2%). Estos resultados sugieren que el mejoramiento realizado por el agricultor y por el fitomejorador ha contribuido al incremento del rendimiento y a mejorar la estabilidad de los maíces de Valles Altos, pero los avances obtenidos en Palomero Toluqueño y Cacahuacintle han sido pequeños, debido quizás a que la mejora de su grano reventador y harinoso, respectivamente, se ha hecho con base en la técnica de selección masal visual, la cual favorece una mayor adaptación pero también un pequeño incremento en el rendimiento por cada ciclo de selección.

Las diferencias entre los criollos podrían estar relacionadas con su origen genético: Palomero Toluqueño y Cacahuacintles han sido consideradas

por Wellhausen *et al.* (1951) como progenitores de Cónico y Chalqueño, predominantes en los Valles Altos del Centro de México y que han originado los criollos que los agricultores siembran en los estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala. Además, Vasal y Córdova (1996) sugirieron que el mayor potencial productivo que se observó en híbridos de maíz tropical y subtropical podría estar relacionado con un aumento en la heterosis, el mejoramiento *per se* de sus líneas de origen geográfico y genético diferente y una mayor respuesta a mejoras ambientales o a prácticas de cultivo.

### Comparación de medias y criterios de estabilidad de Eskridge

En el Cuadro 3 se presenta la información proporcionada por los cuatro métodos de estabilidad para el cálculo de los índices de Eskridge (1991). El rendimiento del testigo (6.46 t ha<sup>-1</sup>) fue mayor ( $p < 0.01$ ) que el de Palomero Toluqueño (4.10 t ha<sup>-1</sup>) y los seis Cacahuacintles (de 4.47 a 5.08 t ha<sup>-1</sup>), pero fue superado ( $p < 0.01$ ) por el de Chalqueño, ETA 13, Cóndor, H-33, H-40, H-44 y H-90E, que produjeron 7.48, 7.91, 7.52, 7.56, 7.78, 7.93 y 8.71 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 4).

**Cuadro 3. Información proporcionada por los métodos de Francis y Kannenberg ( $S_i$ ), de Shukla ( $\sigma^2_i$ ), de Finlay y Wilkinson ( $b_i$ ) y de Eberhart y Russell ( $S^2d_i$ ) para estimar los criterios de estabilidad de Eskridge (1991).**

Clave	Variedad	Origen	$S_i$	$\sigma^2_i$	$b_i$	$S^2d_i$ <sup>†</sup>
1	AS-721	ASPROS	0.503	0.818	1.18	0.1945
2	AS-722	ASPROS	1.288	0.552	1.40	0.1345
3	AS-820	ASPROS	0.690	2.107	1.20	0.4915
4	Cacahuacintle 1	Toluca	2.142	0.572	0.66	0.1385
5	Cacahuacintle 2	ICAMEX	1.831	0.078	0.63	0.0245
6	Cacahuacintle 3	ICAMEX	1.598	0.564	0.62	0.1365
7	Cacahuacintle 4	UAEM	2.200	0.620	0.56	0.1495
8	Cacahuacintle 5	Calimaya	2.341	2.097	0.54	0.4895
9	Cacahuacintle 6	ICAMEX	1.572	0.019	0.71	0.0025
10	Cóndor	ASGROW	1.419	1.034	1.19	0.2445
11	Criollo Chalqueño	Chalco	1.314	0.385	0.98	0.0955
12	Criollo ETA 13	Jocotitlán	1.812	0.221	1.15	0.0575
13	Gavilán	ASGROW	0.665	0.198	1.37	0.0525
14	H-33	INIFAP	1.426	0.717	1.07	0.1715
15	H-40	INIFAP	1.653	0.276	0.98	0.0705
16	H-44	INIFAP	1.887	0.239	1.35	0.0615
17	H-90E	INIFAP	2.811	3.369	1.06	0.7835
18	HIT-3	ICAMEX	0.531	0.148	0.99	0.0415
19	HIT-7	ICAMEX	0.715	0.875	1.40	0.2075
20	Ixtlahuaca (testigo)	ASPROS	0.330	0.583	0.96	0.1415
21	Criollo Negro Carioca	ICAMEX	0.953	0.077	1.26	0.0245
22	Palomero Toluqueño	UAEM	2.792	0.840	0.34	0.1995
23	Criollo San Lucas	Metepec	0.436	0.128	0.83	0.0365
24	VS-46E	INIFAP	0.164	0.001	1.06	0.0055
25	Z-60	HARTZ SEED	0.490	0.225	1.31	0.0585

<sup>†</sup>Para que las desviaciones de regresión de Eberhart y Russell (1966) no fueran negativas, el componente  $S^2e/r$  no fue considerado en la fórmula, siendo  $S^2e$  el cuadrado medio del error combinado y  $r$  el número de repeticiones en cada ambiente.

En los cuatro métodos de Eskridge (1991), los genotipos estables o deseables fueron los que presentaron los mayores índices. Así, el método 1 [el que usa la varianza de un cultivar a través de los ambientes (Francis y Kannenberg, 1978)] detectó 17 variedades estables; los seis Cacahuacintles,

Palomero Toluqueño y H-90E fueron inestables. El método 2 [el que usa la varianza de estabilidad de Shukla (1972)], clasificó 18 variedades estables; AS-820, Cacahuacintles 1, 3, 4 y 5 y Palomero Toluqueño fueron inestables. El método 3 [el que utiliza el coeficiente de regresión de Finlay y

Wilkinson (1963)] detectó 22 variedades estables, con excepción de los Cacahuacintles 4 y 5 y Palomero Toluqueño. El método 4 [el que se calcula con las desviaciones de

regresión de Eberhart y Russell (1966)] identificó 21 variedades estables; los Cacahuacintles 1, 4 y 5, y Palomero Toluqueño fueron inestables (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Rendimiento de grano (RG, t ha<sup>-1</sup>), criterios de estabilidad (M1 a M4) de Eskridge (1991), calculados con d= 3.5 t ha<sup>-1</sup>, y valores del AMMI para la CP1.**

Núm.	Genotipo	RG	M1	M2	M3	M4	AMMI
1	AS-721	6.57(12) <sup>¶</sup>	6.10(4) +	3.39(17) +	14.04(11) +	6.23 (15) +	0.199
2	AS-722	7.33(8)	2.97(12) +	5.15(12) +	7.88(15) +	6.29 (13) +	0.433
3	AS-820	6.14(17)	3.82(8) +	1.81(21)	10.87(13) +	3.55 (19) +	0.426
4	Cacahuacintle 1	4.57(22) *	0.50(22)	1.41(22)	2.59(22) +	1.92 (22)	-0.462
5	Cacahuacintle 2	4.84(21) *	0.73(21)	4.77(14) +	2.98(21) +	2.81 (20) +	-0.443
6	Cacahuacintle 3	5.08(19) *	0.98(19)	2.10(20)	3.42(20) +	2.67 (21) +	-0.360
7	Cacahuacintle 4	4.55(23) *	0.47(23)	1.33(23)	1.96(23)	1.59 (23)	-0.588
8	Cacahuacintle 5	4.47(24) *	0.41(24)	0.67(24)	1.73(24)	1.08 (24)	-0.703
9	Cacahuacintle 6	5.05(20) *	0.98(20)	11.24(3) +	4.40(19) +	4.35 (17) +	-0.318
10	Cóndor	7.52(6) *	2.83(14) +	3.95(15) +	17.42 (9) +	7.36 (11) +	0.257
11	Criollo Chalqueño	7.48(7) *	3.02(11) +	6.41(9) +	163.91 (3) +	12.83 (4) +	-0.075
12	Criollo ETA 13	7.91(3) *	2.43(16) +	9.36(4) +	24.21 (8) +	14.64 (3) +	0.221
13	Gavilán	6.66(10)	4.75 (6) +	7.09(8) +	7.03(17) +	6.26 (14) +	0.467
14	H-33	7.56(5) *	2.84(13) +	4.79(13) +	47.77 (6) +	9.60 (8) +	0.083
15	H-40	7.78(4) *	2.58(15) +	8.13(7) +	176.27 (2) +	16.05 (2) +	-0.082
16	H-44	7.93(2) *	2.34(17) +	9.05(5) +	10.42(14) +	9.00 (9) +	0.441
17	H-90E	8.71(1) *	1.85(18)	2.83(19) +	71.52 (4) +	5.86 (16) +	0.326
18	HIT-3	5.92(18)	4.55 (7) +	6.27(10) +	199.33 (1) +	11.85 (5) +	-0.010
19	HIT-7	6.16(16)	3.72(10) +	2.84(18) +	5.47(18) +	3.99 (18) +	0.578
20	Ixtlahuaca	6.46(13)	8.97 (2) +	3.87(16) +	60.95 (5) +	7.80 (10) +	-0.067
21	Negro Carioca	7.12(9)	3.79 (9) +	12.97(2) +	11.46(12) +	10.27 (7) +	0.280
22	Palom. Toluqueño	4.10(25) *	0.21(25)	0.65(25)	0.74(25)	0.65 (25)	-0.865
23	San Lucas	6.65(11)	7.22 (3) +	8.79(6) +	15.26(10) +	11.20 (6) +	-0.136
24	VS-46E	6.25(15)	16.76 (1) +	86.96(1) +	37.75 (7) +	26.45 (1) +	0.091
25	Z-60	6.46(14)	6.04 (5) +	6.23(11) +	7.86(16) +	6.61(12) +	0.306

\*Variedad con media diferente de la del testigo [Dunnett ( $p=0.01$ ); DMSD= 0.826 t]; <sup>¶</sup>rango de cada variedad; <sup>\*</sup>variedad estable; índice mayor que  $Z_{0.99}=2.334$ .

Los cuatro métodos (M1 a M4) de Eskridge (1991), al utilizar un valor de  $d = 3.5 \text{ t ha}^{-1}$ , identificaron entre 17 (M1) y 22 (M3) variedades sobresalientes (entre 5.92 y 7.93 t ha<sup>-1</sup>); pero sólo Cóndor, Chalqueño, ETA 13, H-33, H-40 y H-44 superaron la media general y la del testigo (Cuadro 4). Estos cuatro métodos y el modelo AMMI clasificaron a Chalqueño, H-33, H-40, HIT-3 y VS-46E como los genotipos deseables. Sin embargo, se sugiere que sólo los tres primeros se empleen en un programa de mejoramiento genético o de generación de tecnología, debido a que tuvieron rendimientos de grano cercanos a 7.5 t ha<sup>-1</sup>. Aún cuando Palomero Toluqueño y los Cacahuacintles 4 y 5 fueron inestables y tuvieron rendimientos inferiores

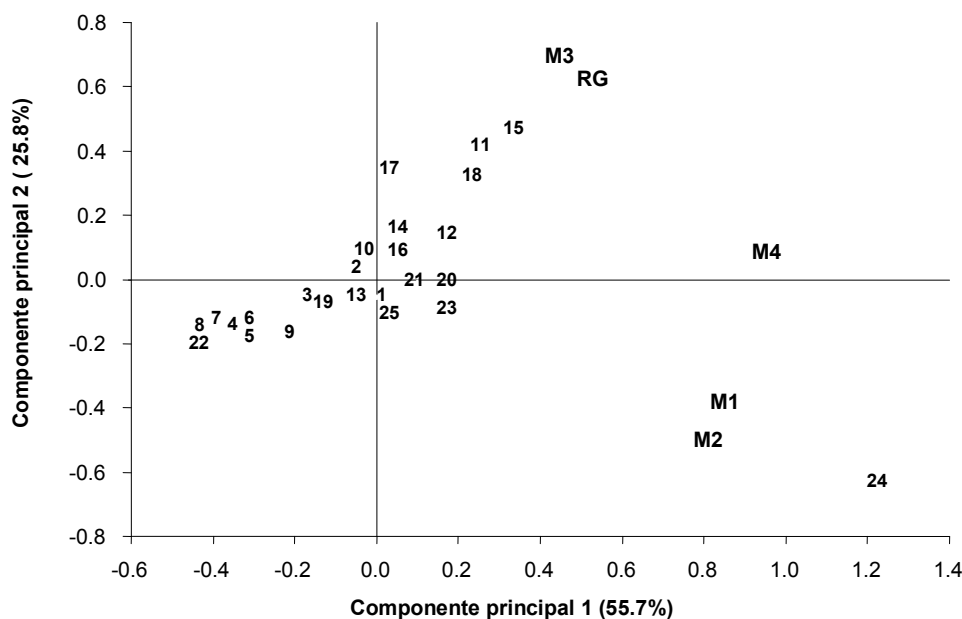
a la media general y a la del testigo (Cuadro 4, Figura 1), sus granos reventadores o harinosos tienen mayor demanda y un precio hasta seis veces mayor que el de otras variedades de grano semidentado o cristalino (González *et al.*, 2006). En estos maíces tipo reventador y harinoso, la forma como el agricultor elige su semilla, basado en las características de la mazorca identificadas después de la cosecha, en sólo una localidad, y sin el conocimiento de los progenitores masculinos que intervienen en la polinización, podrían estar asociados a una base genética estrecha y, por lo tanto, a bajos rendimientos e inestabilidad (Louette y Smale, 1998; Herrera *et al.*, 2002).



### Análisis genotipo x método de Eskridge

Esta técnica fue confiable debido a que casi 82% de la suma de cuadrados de la variación original se explicó por las

dos primeras componentes principales (Figura 2). Crossa (1990) recomendó emplear la técnica del biplot solo si las dos primeras componentes principales explican más de 75% de la variación total.



**Figura 2. Representación de los dos primeros componentes principales de 25 genotipos y cuatro métodos de Eskridge (M1 a M4) de acuerdo con el análisis genotipo x índice de estabilidad.**

Los métodos 1 y 2 identificaron como genotipos deseables a VS-46E (24), AS-721 (1), Ixtlahuaca (20), Negro (21), San Lucas (23) y Z-60 (25), con rendimientos entre 6.25 y 7.12 t ha<sup>-1</sup>. Los métodos 3 y 4 identificaron como genotipos sobresalientes a HIT-3 (18), AS-722 (2), H-33 (14), Cóndor (10), Chalqueño (11), H-40 (15), ETA 13 (12) H-44 (16), y H-90E (17), que produjeron entre 5.92 y 8.71 t ha<sup>-1</sup>. Los genotipos inestables, o sea, los que tuvieron los menores índices y que no interaccionaron positivamente con ningún método de Eskridge, fueron Palomero Toluqueño (22), los seis Cacahuacintles (4 a 9), AS-820 y HIT-7 (19). Los métodos 1 y 2 están relacionados con el concepto de estabilidad estática o biológica. Yan y Kang (2003) comentaron que los genotipos con varianzas pequeñas a través de los ambientes se clasificaran como estables.

En el presente estudio los genotipos VS-46E, AS-721, Ixtlahuaca, Negro, San Lucas y Z-60 interaccionaron positivamente con ambos métodos, por lo que deben clasificarse como estables

pero indeseables, porque su respuesta a la aplicación de mayores insumos o a mejoras en las condiciones ambientales será menor que el de las variedades con estabilidad dinámica.

En el presente estudio se detectó poca asociación entre RG y M3 con M4; con M3 se determinó que la mayoría de los genotipos presentaron respuesta lineal a los ambientes y con M4 se detectó que la mayoría de los genotipos no se desviaron significativamente de la respuesta lineal, por lo que se deduce que ambos métodos condujeron a resultados similares y es necesario una mayor exploración en tiempo (años) y espacio (localidades), que permita identificar confiablemente maíces sobresalientes en Valles Altos, como lo sugirió Sahagún (1992).

Estos resultados coinciden parcialmente con los publicados por Eskridge (1991). De acuerdo con Lin *et al.* (1986) el método 1, el que se calcula con la varianza de un cultivar a través de los ambientes, pertenece al grupo 1, mientras que los métodos 3 y 2, que miden que tanto la respuesta de un

cultivar a los ambientes es paralela a la respuesta promedio de todos los genotipos del ensayo, pertenecen al grupo 2; el método 4 incluye información de los grupos 2 y 3, por lo que debe estar más relacionado con ambos métodos.

Los métodos 3 y 4 están relacionados con el concepto de estabilidad dinámica o agronómica. Yan y Kang (2003) comentaron que un genotipo es estable si su comportamiento en cada ambiente corresponde al nivel predicho o estimado, por lo que tiene el potencial para responder favorablemente a la aplicación de insumos o a mejores ambientes; un genotipo con mayor asociación genotipo x ambiente, también podría tener mayor adaptabilidad y, por lo tanto, ser el más deseable. Los híbridos AS-722, Cóndor, H-33, H-40, H-44 y H-90E presentaron mayor adaptabilidad que los criollos, por lo que deben considerarse como los más deseables; estos resultados podrían estar relacionados con las técnicas y la tecnología empleadas en su mejoramiento genético. Los híbridos de mayor rendimiento y estabilidad responden mejor a ambientes favorables, como suelos fértiles, siembras en riego, punta de riego, humedad residual y buen temporal, así como a la aplicación de mayores insumos.

## CONCLUSIONES

Con el modelo AMMI se detectaron diferencias significativas ( $p < 0.01$ ) entre ambientes (A), entre genotipos (G), en la interacción GxA; su contribución al modelo fue de 45.1, 48.4 y 6.5 %, respectivamente. Además, la componente principal 1 explicó el 69.4 % de la interacción GxA. Con esta técnica se identificó a los cultivares Ixtlahuaca, San Lucas, HIT-3, Chalqueño, H-33 y H-40, como los más estables. La variedad Ixtlahuaca (testigo, 6.46 t ha<sup>-1</sup>) superó en 2.3 t ha<sup>-1</sup> a Palomero Toluqueño y en 2.0 y 1.48 t ha<sup>-1</sup> a los Cacahuacintles de menor y mayor rendimiento, pero Chalqueño, ETA 13, Cóndor, H-33, H-40, H-44 y H-90E (entre 7.48 y 8.71 t ha<sup>-1</sup>), la superaron entre 1.0 y 2.25 t ha<sup>-1</sup>. El mejor método para definir estabilidad fue la técnica multivariada genotipo x índice, al agrupar a los genotipos y a los índices de Eskridge por su estabilidad estática o dinámica: H-40, HIT-3, San Lucas y VS-46E fueron los más estables, pero sólo la primera superó ( $\alpha = 0.01$ ) al testigo y a la media general.

## LITERATURA CITADA

- Arellano, V. J. L.; Tut, C. C.; María, R. A.; Salinas, M. Y. y Taboada, G. O. R. 2003. Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Rev. Fitotec. Mex.* 26(2):101-108.
- Castañón, N. G.; Zetina, R.; Arano, R. y Raygoza, B. 2000. El AMMI y el cluster en la selección de los mejores híbridos experimentales de maíz. *Agron. Mesoamer.* 11(1):71-76.
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Crossa, J.; Gauch Jr, H. G. and Zobel, R. W. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Sci.* 30(3):493-500.
- De León, C. H.; Rincón, S. F.; Reyes, V. M. H.; Sámano, G. D.; Martínez, Z. G.; Cavazos, C. R. y Figueroa, C. J. D. 2005. Potencial de rendimiento y estabilidad de combinaciones germoplásmicas formadas entre grupos de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 28(2):135-143.
- Eagles, H. A. and Lothrop, J. E. 1994. Highland maize from Central Mexico - Its origin, characteristics and use in breeding programs. *Crop Sci.* 34:11-19.
- Eberhart, S. A. and Russell, W. A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- Eskridge, K. M. 1990. Selection of stable cultivars using a safety-first rule. *Crop Sci.* 30:369-374.
- Eskridge, K. M. 1991. Screening cultivars for yield stability to limit the probability of disaster. *Maydica.* 36:275-282.
- Finlay, K. W. and Wilkinson, G. N. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 14:742-754.
- Francis, T. R. and Kannenberg, L. W. 1978. Yield stability studies in short season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 58:1029-1034.
- Gámez, V. A. J.; Ávila, P. M. A.; Ángeles, A. H.; Díaz, H. C.; Ramírez, V. H.; Alejo, J. A. y Terrón, I. A. 1996. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. Toluca, Estado de México, 102 p. (Publicación Especial Núm. 16).
- Gauch, H. G. 2006. Statistical analyses of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46:1488-1500.

- González, H. A.; Sahagún, C. J.; Pérez, L. D. J.; Domínguez, L. A.; Serrato, C. R.; Landeros, F. V. y Dorantes, C. E. 2006. Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en El Valle de Toluca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(3):255-261.
- González, H. A.; Vázquez, G. L. M.; Sahagún, C. J.; Rodríguez, P. J. E. y Pérez, L. D. J. 2007. Rendimiento del maíz de temporal y su relación con la pudrición de mazorca. *Agric. Téc. Méx.* 33(1):33-42.
- Herrera, C. B. E.; Macías, L. A.; Díaz, R. R.; Valadez, R. M. y Delgado, A. A. 2002. Uso de semilla criolla y caracteres de mazorca para la selección de semilla de maíz en México. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(1):17-24.
- Herrera, C. B. E.; Castillo, G. F.; Sánchez, G. J. J.; Hernández, C. J. M.; Ortega, P. R. y Goodman, M. M. 2004. Diversidad del maíz Chalqueño. *Agrociencia.* 38(2):191-206.
- Lin, C. S.; Binns, M. R. y Lefkovitch, L. P. 1986. Stability analysis: Where do we stand?. *Crop Sci.* 26:894-900.
- Louette, D. and Smale, M. 1998. Farmers' seed selection practices and maize variety characteristics in a traditionally-based mexican community. CIMMYT Economics Working Paper No. 98-04, México, D. F. 28 p.
- Márquez, S. F. 1992. La interacción genético-ambiental en genotecnia vegetal. *In: memorias del simposio Interacción Genotipo-Ambiente en Genotecnia Vegetal.* 26 y 27 de marzo, Sociedad Mexicana de Fitogenética, Guadalajara, Jalisco, p. 1-27.
- Montgomery, D. C. 1991. Design and analysis of experiments. Third Edition. John Wiley and Sons, Singapore, 649 p.
- Nava, P. F.; Mejía, C. J. A.; Castillo, G. F. y Molina, G. J. D. 2000. Evaluación de maíces precoces e intermedios en Valles Altos Centrales de México. I. Poblaciones sobresalientes. *Rev. Fitotec. Mex.* 23(1):119-128.
- Nava, P. F. y Mejía, C. J. A. 2002. Evaluación de maíces precoces e intermedios en Valles Altos Centrales de México. II. Divergencia genética. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(2):187-192.
- Niño, C. V.; Nicolás, M. C.; Pérez, L. D. J. y González, H. A. 1998. Estudio de trece híbridos y cinco variedades de maíz en tres localidades del Valle Toluca- Atlacomulco. *Revista Ciencias Agrícolas Informa.* 12:33-43.
- Rodríguez, P. J. E.; Sahagún, C. J.; Villaseñor, M. H. E.; Molina, G. J. D. y Martínez, G. A. 2002. Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.) de temporal. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(2):143-151.
- Romero, P. J.; Castillo, G. F. y Ortega, P. R. 2002. Cruzas de poblaciones nativas de maíz de la raza Chalqueño. II. Grupos genéticos, diversidad genética y heterosis. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(1):107-116.
- Sahagún, C. J. 1992. El ambiente, el genotipo y su interacción. *Rev. Chapingo* 79 y 80:5-12.
- Sahagún, C. J. 1998. Evaluaciones genotípicas en series de experimentos. *Germen* 14. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. 40 p.
- Sánchez, G. J. J. 1995. El análisis biplot en clasificación. *Rev. Fitotec. Mex.* 18:188-203.
- Shukla, G. K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype - environmental components of variance. *Heredity* 29:237-245.
- Telser, L. G. 1955. Safety first and hedging. *Review of Economic Studies* 23:1-16.
- Vargas, H. M. y Crossa, J. 2000. El análisis AMMI y la gráfica del biplot en SAS. Unidad de Biometría. CIMMYT, México ([www.cimmyt.cgiar.org/biometrics](http://www.cimmyt.cgiar.org/biometrics)).
- Vasal, S. K.; Srinivasan, G.; Vergara, A. N. y González, C. F. 1995. Heterosis y aptitud combinatoria en germoplasma de maíz de Valles Altos. *Rev. Fitotec. Mex.* 18(2):123-139.
- Vasal, S. K. y Córdoba, S. H. 1996. Heterosis en maíz: acelerando la tecnología de híbridos de dos progenitores para el mundo en desarrollo. *In: memoria del Curso Internacional de Actualización en Fitomejoramiento y Agricultura Sustentable.* UAAAN. Departamento de Fitomejoramiento. Buenavista, Saltillo, p. 32-54.
- Velásquez, C. G. A.; Tut, C. C.; Lothrop, J.; Virgen, V. J. y Salinas, M. Y. 2005. H-40, híbrido de maíz de grano blanco para los Valles Altos de México. Centro de Investigación Regional del Centro, Campo Experimental Valle de México, INIFAP, 23 p. (Folleto Técnico No. 21).
- Wellhausen, E. J.; Roberts, L. M. y Hernández, X. E. en colaboración con Mangelsdorf, P. C. 1951. Razas de maíz en México: su origen, características y distribución. Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería, México, D. F. 237 p. (Folleto Técnico Núm. 5).

Yan, W. and Kang, M. S. 2003. GGE Biplot Analysis: a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 276 p.

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