

## Interacción genotipo\*ambiente en maíz cultivado en Tamaulipas, México\*

## Genotype\*environment interaction in maize grown in Tamaulipas, Mexico

César A. Reyes-Méndez<sup>1</sup>, Miguel A. Cantú-Almaguer<sup>1</sup>, Homar R. Gill-Langarica<sup>2</sup>, Jesús G. García-Olivares<sup>2</sup> y Netzahualcoyotl Mayek Pérez<sup>2,3§</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Rio Bravo-INIFAP. Carretera Matamoros-Mazatlán, km 100. Río Bravo, Tamaulipas, México. CP. 88900. (reyes.cesar@inifap.gob.mx; cantu.miguel@inifap.gob.mx). <sup>2</sup>Centro de Biotecnología Genómica-IPN. Blvd. del Maestro s/n esq. Elias Piña, Col. Narciso Mendoza, Reynosa, Tamaulipas, México. CP. 88710. Tel/Fax. (899) 9243627. (hgill@ipn.mx; jggarcia@ipn.mx). <sup>3</sup>Universidad México Americana del Norte A. C. Primera s/n, Col. El Círculo, Reynosa, Tamaulipas, México. CP. 88640. Tel. (899) 9222002. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: nmayeklp@yahoo.com.mx.

### Resumen

En el norte de Tamaulipas, México se cultivan entre 30 mil y 100 mil hectáreas con maíz (*Zea mays* L.) cada año. La superficie varía debido a la incidencia de factores bióticos (plagas de insectos, hongos toxígenos) y abióticos (alta temperatura, salinidad del suelo, sequía), así como la disponibilidad de agua para riego. Por tal razón, alternativas culturales, genéticas, biológicas y químicas para el manejo del cultivo se deben evaluar constantemente para maximizar el rendimiento y la calidad de grano. En este trabajo, se evaluó el comportamiento agronómico y la interacción genotipo x ambiente de ocho híbridos de maíz sembrados en cuatro fechas de siembra y tres años de cultivo con base el análisis de la interacción de efectos principales aditivos y multiplicativos (AMMI) y el modelo genotipo, genotipo x ambiente (GGA) Biplot; así como en el análisis de sendero secuencial (ASS). El análisis AMMI para rendimiento de grano indicó diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre híbridos y ambientes de prueba. El análisis de componentes principales indicó que los dos primeros componentes (CP) contribuyeron con 76% de la varianza total (PC1=20 y PC2=56%); el análisis GGE biplot indicó que DK-697 fue el híbrido con mayor rendimiento y

### Abstract

In northern Tamaulipas, Mexico between 30 000 and 100 000 hectares with maize (*Zea mays* L.) are grown each year. The surface varies due to the incidence of biotic factors (insect pests, toxigenic fungi) and abiotic factors (high temperature, soil salinity, drought), as well as the availability of water for irrigation. For this reason, cultural, genetic, biological and chemical alternatives for crop management must be constantly evaluated to maximize yield and grain quality. In this paper, the agronomic behavior and genotype x environment interaction of eight maize hybrids planted at four sowing dates and three years of cultivation based on the analysis of the interaction of main and additive main effects (AMMI) and model Genotype, genotype x environment (GGA) Biplot were evaluated; as well as in sequential trail analysis (ASS). The AMMI analysis for grain yield indicated significant differences ( $p \leq 0.01$ ) between hybrids and test environments. Main components analysis indicated that the first two components (CP) contributed 76% of the total variance (PC1=20 and PC2=56%); the GGE biplot analysis indicated that DK-697 was the hybrid with higher yield and greater stability. The biplot graphic showed that the vectors

mayor estabilidad. El gráfico biplot mostró que los vectores estuvieron más alejados del centro para el año 2006A, 2006B, 2006C y 2007A (mayores interacción y capacidad de discriminación de genotipos), mientras que los vectores más cercanos fueron 2008B y 2008C (menor interacción). Entre híbridos, los más alejados del origen (menos estables) fueron H-437 y G-8222; el más cercano al origen y más estable fue DK-697. El análisis ASS detectó colinealidad moderada para todas las características evaluadas, con efectos fuertes del número de mazorcas sanas (Valor de Inflación de la Varianza o VIF= -1.41) y peso de mazorca (VIF= -1.19). Las variables con mayor asociación al rendimiento de grano fueron peso de mazorca, altura de planta, relación de altura de planta/mazorca y número de mazorcas sanas que explicaron 86% de la variación.

**Palabras claves:** *Zea mays* L., AMMI, análisis de sendero secuencial, análisis GGE biplot, biplot, estabilidad del rendimiento de grano.

## Introducción

En México, el maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante debido a que anualmente se siembran más de 7.4 millones de hectáreas, con una producción global de más de 23.2 millones de toneladas. El promedio del rendimiento de grano unitario ( $3.3 \text{ t ha}^{-1}$ ) en 2014 (SIAP, 2016) indica rendimientos bajos en virtud, principalmente, a que el maíz se cultiva en alrededor de 85% de la superficie en condiciones de temporal o secano, que depende del régimen de lluvias, frecuentemente errático e insuficiente para cubrir la demanda hídrica del cultivo. Para estas condiciones variables, los programas de mejoramiento genético de maíz en México han generado una amplia diversidad de genotipos con base en la aplicación de diferentes estrategias de selección y evaluación (Ángeles-Arrieta, 2000). Específicamente, en el norte del estado de Tamaulipas la superficie cultivada con maíz varía cada año entre 30 mil y 100 mil hectáreas. Por ejemplo en 2014 se cultivaron más de 67 000 ha con rendimientos globales de más de 360 000 t ( $5.4 \text{ t ha}^{-1}$ ). Las variaciones en superficie dependen fundamentalmente de la disponibilidad de agua para riego o bien, la incidencia de plagas y enfermedades. Por tal razón, alternativas culturales, genéticas, biológicas y químicas de manejo del cultivo se evalúan constantemente para maximizar rendimiento y calidad de grano (Reyes-Méndez y Cantú-Almaguer, 2006).

were further away from the center for year 2006A, 2006B, 2006C and 2007A (greater interaction and genotyping ability), while the nearest vectors were 2008B and 2008C (lower interaction). Among hybrids, the most remote from the origin (less stable) were H-437 and G-8222; the closest to the origin and more stable was DK-697. The ASS analysis detected moderate colinearity for all evaluated characteristics, with strong effects of the number of healthy cobs (Influence Value of Variance or FV=-1.41) and cob weight (FV=-1.19). The variables with the greatest association to grain yield were cob weight, plant height, plant height/cob ratio and number of healthy cobs explaining 86% of the variation.

**Keywords:** *Zea mays* L., AMMI, biplot, GGE biplot analysis, grain yield stability, sequential trail analysis.

## Introduction

In Mexico, maize (*Zea mays* L.) is the most important crop, more than 7.4 million hectares are planted annually, with a global production of more than 23.2 million tons. The average unit grain yield ( $3.3 \text{ t ha}^{-1}$ ) in 2014 (SIAP, 2016) indicates low yields mainly because maize is grown at about 85% of the area under temporary or dry conditions, which depends on the rainfall regime, which is often erratic and insufficient to cover the water demand of the crop. For these variable conditions, maize genetic improvement programs in Mexico have generated a wide diversity of genotypes based on the application of different selection and evaluation strategies (Ángeles-Arrieta, 2000). Specifically, in the north of Tamaulipas, the area planted with maize varies between 30 000 and 100 000 hectares each year. For example, in 2014 more than 67 000 ha were grown with global yields of more than 360 000 t ( $5.4 \text{ t ha}^{-1}$ ). The surface variations depend mainly on the availability of water for irrigation or the incidence of pests and or diseases. For that reason, cultural, genetic, biological and chemical alternatives for crop management are constantly evaluated to maximize yield and grain quality (Reyes-Méndez and Cantú-Almaguer, 2006).

Substantial progress in increasing grain yield are based on achieving optimum adaptation of the genotype to each production environment, as well as the combination of desirable traits such as grain quality and resistance to abiotic and biotic stress. Another factor that supports the breeder is the evaluation of the magnitude and direction of the association between grain yield and its components as well as the relative

Los progresos sustantivos en el incremento del rendimiento de grano se fundamentan en lograr la óptima adaptación del genotipo a cada ambiente de producción, así la conjunción de caracteres deseables tales como la calidad del grano y la resistencia al estrés abiótico y biótico. Otro factor que apoya al fitomejorador es la evaluación de la magnitud y la dirección de la asociación entre el rendimiento de grano y sus componentes así como la importancia relativa de cada factor involucrado en la contribución al rendimiento de grano (Agrama, 1996). No obstante lo anterior, es frecuente observar germoplasma sin buena adaptación a ambientes variables o bien, germoplasma con adaptación ambiental específica o local (González-Martínez *et al.*, 2014; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015). En maíz, se ha determinado que el número de mazorcas por planta tienen el mayor efecto directo en rendimiento de grano, aunque también hay efectos indirectos vía el número de granos por mazorca, la prolificidad o el tamaño de grano, características que sirven en el mejoramiento del rendimiento del maíz (Agrama, 1996).

Márquez-Sánchez (1991) definió como una variedad estable aquella con capacidad de amortiguar o de ajustarse a las condiciones ambientales prevalentes. En mejoramiento genético la estabilidad espacial y temporal debe evaluarse para incrementar la eficiencia del proceso de selección, debido a que las características económicamente importantes son medibles, muestran distribución continua y son poligénicas, así como afectadas por el ambiente (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

En maíz se han desarrollado variedades e híbridos con comportamiento estable mediante la aplicación de metodologías que consideran parámetros de estabilidad, particularmente del rendimiento de grano (Fan *et al.*, 2007; Cargnelutti *et al.*, 2009; García *et al.*, 2009; Kandus *et al.*, 2010; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015). Igualmente, diversos estudios han enfatizado que, a través del análisis de sendero secuencial, la selección de germoplasma superior en rendimiento se basa en caracteres como el número de granos por mazorca, tamaño del grano o número de mazorcas por planta, estrecha y positivamente asociados con el rendimiento del maíz (Agrama, 1996; Mohammadi *et al.*, 2003; Nemati *et al.*, 2009).

Entre las alternativas de análisis de la IGA están el modelo AMMI (Análisis de la interacción de efectos principales aditivos y multiplicativos) basado en un modelo lineal-bilineal y que estima estabilidad, evalúa ambientes y

importancia de cada factor involucrado en la contribución a grain yield (Agrama, 1996). However, it is common to observe germplasm without good adaptation to variable environments or germplasm with specific or local environmental adaptation (González-Martínez *et al.*, 2014; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015). In maize, it has been determined that the number of cobs per plant has the greatest direct effect on grain yield, although there are also indirect effects like the number of grains per cob, prolificacy or grain size, characteristics that serve in breeding of maize yield (Agrama, 1996).

Márquez-Sánchez (1991) defined as a stable variety the one with the capacity to cushion or to adjust to the prevailing environmental conditions. In genetic improvement, spatial and temporal stability must be evaluated to increase the efficiency of the selection process, since the economically important characteristics are measurable, continuously distributed and are polygenic as well as affected by the environment (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

In maize, varieties and hybrids with stable behavior have been developed through the application of methodologies that consider stability parameters, particularly grain yield (Fan *et al.*, 2007; Cargnelutti *et al.*, 2009; García *et al.*, 2009; Kandus *et al.*, 2010; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015). Also, several studies have emphasized that, through sequential trail analysis, the selection of superior germplasm in yield is based on characters such as the number of grains per cob, grain size or number of cobs per plant, closely and positively associated with maize yield (Agrama, 1996; Mohammadi *et al.*, 2003; Nemati *et al.*, 2009).

Among the alternatives of IGA analysis are the AMMI model (Analysis of the interaction of main and additive multiplicative effects) based on a linear-bilinear model that estimates stability, evaluates environments and classifies them (Crossa *et al.*, 1990); as well as model regression analysis at sites (SREG), also known as GGE biplot graphic (Yan *et al.*, 2000). On the other hand, the evaluation of the genotypes behavior and the effects of the components on grain yield expression can be determined based on the sequential trail analysis (ASS), where the correlations between characters with direct effects and indirect responses in a variable response (Whittaker *et al.*, 2009). In order to select genotypes, the correlations of variables are broken down into causal effects, identifying chains of causality between them. Thus, SSA distinguishes between the real effects of predictor variables and the adjustment of several data groups, offering advantages over conventional trail analysis (Kozak and Antunes-Azevedo, 2014).

los clasifica (Crossa *et al.*, 1990); así como el modelo de análisis de regresión en los sitios (SREG), también conocida como gráfico GGE biplot (Yan *et al.*, 2000). Por otro lado, la evaluación del comportamiento de genotipos y de los efectos de los componentes en la expresión del rendimiento de grano se puede determinar con base en el análisis de sendero secuencial (ASS), donde se estiman las correlaciones entre caracteres con efectos directos e indirectos en una variable respuesta (Whittaker *et al.*, 2009). Para seleccionar genotipos, se descomponen las correlaciones de variables en efectos causales, identificando cadenas de causalidad entre ellas. Así, el ASS discierne entre los efectos reales de las variables predictoras y el ajuste de varios grupos de datos, ofreciendo ventajas sobre el análisis de sendero convencional (Kozak y Antunes-Azevedo, 2014).

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar el comportamiento productivo y la adaptación de híbridos de maíz a diferentes fechas de siembra y años de prueba (ambientes) en el norte de Tamaulipas, para ello se aplicó el AMMI, GGE biplot y el análisis de sendero secuencial (ASS).

## Materiales y métodos

El estudio se condujo durante tres ciclos de cultivo (2006, 2007 y 2008) en el Campo Experimental Río Bravo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Río Bravo, Tamaulipas, México (25° 57' latitud norte, 98° 01' longitud oeste; 30 msnm). Los suelos del sitio experimental son de textura arcillosa, pH=7.5 y bajo contenido de materia orgánica (1.1%). Cada experimento incluyó cinco híbridos de maíz con grano blanco (H-437, H-439, H-440, P-3025, Tigre) y tres híbridos con grano amarillo (G-8222, P-31G98, DK-697) (Cuadro 1) mismos que se sembraron en cuatro fechas de siembra cada siete días durante enero y febrero de cada año, todas dentro del rango óptimo para maíz en el sitio de prueba (Cuadro 2) (Reyes-Méndez y Cantú-Almaguer, 2006).

Cada experimento se estableció en un diseño experimental de bloques completos al azar con un arreglo en parcelas divididas, donde la parcela grande correspondió a las fechas de siembra y la parcela chica a los híbridos de maíz. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones; la parcela experimental constó de cuatro surcos de 5 m de largo espaciados a 0.8

The objective of this paper was to evaluate the productive behavior and the adaptation of maize hybrids to different sowing dates and test years (environments) in the north of Tamaulipas, for which AMMI, GGE biplot and trail analysis Sequential (ASS) were applied.

## Materials and methods

The study was conducted during three crop cycles (2006, 2007 and 2008) at the Río Bravo Experimental Field of the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP) in Río Bravo, Tamaulipas, Mexico (25° 57' north latitude, 98° 01' west longitude, 30 meters above sea level). Soils of the experimental site are of clay texture, pH= 7.5 and low content of organic matter (1.1%). Each experiment included five hybrids of white maize (H-437, H-439, H-440, P-3025, Tigre) and three hybrids with yellow grain (G-8222, P-31G98, DK-697) (Table 1), which were planted at four planting dates every seven days during January and February of each year, all within the optimum range for maize at the test site (Table 2) (Reyes-Méndez and Cantú-Almaguer, 2006).

**Cuadro 1. Características de híbridos de maíz evaluados en Río Bravo, Tamaulipas (2006-2007, 2008).**  
**Table 1. Characteristics of maize hybrids evaluated in Río Bravo, Tamaulipas (2006-2007, 2008).**

Genotipo	Color de endospermo	Tipo de cruza	Maduración
DK-697	Amarillo	Simple modificada	Intermedio
P-3025	Blanco	Simple modificada	Intermedio precoz
P-31G98	Amarillo	Simple modificada	Intermedio precoz
Tigre	Blanco	Trilineal	Intermedio tardío
G-8222	Amarillo	Simple modificada	Intermedio precoz
H-437	Blanco	Trilineal	Intermedio tardío
H-439	Blanco	Trilineal	Intermedio tardío
H-440	Blanco	Trilineal	Precoz

Each experiment was established in a randomized complete block experimental design with a split plot arrangement, where the large plot corresponded to the dates of planting

m entre sí. Los terrenos y experimentos se prepararon y condujeron de acuerdo con el paquete tecnológico para maíz generado por INIFAP en la región (Reyes-Méndez y Cantú-Almaguer, 2006).

En cada parcela experimental se estimó el peso de mazorcas ‘en campo’ (PT, que incluyó grano y olote sin ajuste de humedad), peso de mazorcas (PM, con grano y olote ajustado a 14% de humedad), rendimiento de grano (RG, ajustado al 14% de humedad), días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF), número de mazorcas sanas (NMS) y enfermas (NME), altura de planta (AP) y de mazorca (AM), relación altura de planta mazorca (RAPM).

El análisis de la interacción genotipo-ambiente se llevó a cabo con el modelo AMMI en el programa SAS versión 9.0 (Crossa *et al.*, 1990), además del análisis GGE Biplot (Vargas y Crossa, 2000; Burgueño *et al.*, 2002). Para ello se generaron 12 ‘ambientes’ producto de la combinación de cuatro fechas de siembra por tres años de prueba. Posteriormente, se realizó el análisis de sendero secuencial (ASS) con base en la estimación de los valores de inflación de la varianza (VIFs) y los de tolerancia. En este caso, las variables peso de mazorca (PM), altura de planta (AP), relación altura de planta mazorca (RAPM) y número de mazorcas sanas (NMS) se consideraron variables de primer orden. Para identificar las variables de primer orden, el procedimiento se repitió considerando las variables antes mencionadas como variables dependientes de segundo orden. Los coeficientes de determinación parcial (análogo al  $R^2$  del análisis de regresión lineal) se calcularon del coeficiente de sendero para todas las variables (Williams *et al.*, 1990).

and the small plot to the maize hybrids. Each treatment had four replicates; the experimental plot consisted of four furrows 5 m long spaced 0.8 m apart. Soils and experiments were prepared and conducted in accordance with the INIFAP maize technology package for the region (Reyes-Méndez and Cantú-Almaguer, 2006).

In each experimental plot there were estimated: the ‘field weight’ of cobs (PT, which included grain and olote without moisture adjustment), weight of cobs (PM, with grain and olote adjusted to 14% moisture), grain yield (RG, adjusted to 14% moisture), days to male flowering (DFM) and days to female flowering (DFF), number of healthy cobs (NMS) and number of sick cobs (NME), plant height (AP) and cob height (AM), plant height-cob ratio (RAPM).

The analysis of the genotype-environment interaction was carried out with the AMMI model in the SAS version 9.0 program (Crossa *et al.*, 1990), in addition to the GGE Biplot analysis (Vargas and Crossa, 2000; Burgueño *et al.*, 2002). 12 ‘environments’ were generated as a result of the combination of four dates of planting and three years of testing. Subsequently, the sequential trail analysis (ASS) was performed based on the estimation of the Influence Values of the Variance (VIFs) and the tolerance values. In this case, the variables cob weight (PM), plant height (AP), height plant-cob ratio (RAPM) and number of healthy ecobsars (NMS) were considered first order variables. In order to identify the first order variables, the procedure was repeated considering the variables mentioned above as second order dependent variables. The coefficients of partial determination (analogous to  $R^2$  of the linear regression analysis) were calculated from the path coefficient for all variables (Williams *et al.*, 1990).

## Cuadro 2. Condiciones ambientales en los experimentos con híbridos de maíz sembrados en diferentes años y fechas de siembra. Río Bravo, Tamaulipas.

Table 2. Environmental conditions in the experiments with maize hybrids planted in different years and dates of sowing. Río Bravo, Tamaulipas.

Fecha de siembra	AMB	Promedios a floración				Promedios a madurez			
		TMax (°C)	TMin (°C)	TMed (°C)	PP (mm)	TMax (°C)	TMin (°C)	TMed (°C)	PP (mm)
20 enero 2006	2006A	26.8	15.3	21.1	41.8	29	14.3	20.1	40.4
27 enero 2006	2006B	27.5	15.9	21.7	42.6	26.7	14.7	20.7	40.4
03 febrero 2006	2006C	27.6	16.5	22.1	42.6	26.9	15.3	21.1	40.4
10 febrero 2006	2006D	28.1	17.3	22.7	42.6	27.3	16.2	21.7	40.4
Media		27.5	16.3	21.9	42.4	27.5	15.1	20.9	40.4

AMB= ambiente; TMax= temperatura media máxima; TMin= temperatura media mínima; TMed= temperatura media; PP= precipitación pluvial total.



**Cuadro 2. Condiciones ambientales en los experimentos con híbridos de maíz sembrados en diferentes años y fechas de siembra. Río Bravo, Tamaulipas. (Continuación).****Table 2. Environmental conditions in the experiments with maize hybrids planted in different years and dates of sowing. Río Bravo, Tamaulipas. (Continuation).**

Fecha de siembra	AMB	Promedios a floración				Promedios a madurez			
		TMax (°C)	TMin (°C)	TMed (°C)	PP (mm)	TMax (°C)	TMin (°C)	TMed (°C)	PP (mm)
24 enero 2007	2007A	25.2	14.1	19.6	51.8	24.5	13.5	19	49
02 enero 2007	2007B	26.2	14.9	20.6	29.2	25.5	14.1	19.8	26.4
09 febrero 2007	2007C	26.6	15.1	20.8	29.2	26.2	14.6	20.4	29.2
16 febrero 2007	2007D	27.9	16.5	22.2	31.8	27.1	15.3	26.2	24.6
Media		26.5	15.1	20.9	35.5	25.8	14.5	21.7	32.3
22 enero 2008	2008A	28	15.4	21.7	15.4	27.7	14.8	21.3	19
29 enero 2008	2008B	28.7	15.7	22.2	31.6	28.6	15.3	22	34
05 febrero 2008	2008C	29.2	16.4	22.8	31	29	15.7	22.3	33.6
12 febrero 2008	2008D	29.2	16.3	22.8	31	29	15.6	22.3	33.6
Media		28.8	15.9	22.4	27.3	28.6	15.4	22	30.1

AMB= ambiente; TMax= temperatura media máxima; TMin= temperatura media mínima; TMed= temperatura media; PP= precipitación pluvial total.

**Resultados**

El análisis de varianza del modelo AMMI para rendimiento de grano (RG) mostró diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre ambientes, indicando que las diferencias entre los promedios de dicha fuente de variación contribuyeron a las diferencias en el rendimiento de grano entre genotipos de maíz. La contribución del efecto de la IGA en la suma de cuadrados fue mayor que la de genotipos, demostrando diferencias genotípicas en respuesta a los ambientes de prueba (Cuadro 3). El análisis de componentes principales indicó que los dos primeros componentes principales fueron significativos ( $p \leq 0.01$ ) y, en conjunto, explicaron 76.6% (CP1 56.2% y CP2 20.4%) de la variación total debida a la interacción (datos no incluidos). El híbrido más estable y con menor IGA mostró valores entre -0.3 a 0.3 en el primer componente principal (CP1) del AMMI y fue DK-697 (Figura 1).

Los ambientes (año\*fecha de siembra) más alejados fueron 2006A, 2006B, 2006C y 2007A; mientras que los vectores más cercanos al origen correspondieron a 2008B y 2008C (Cuadro 2, Figura 2). Los híbridos más alejados del centro del biplot (H-437 y G-8222) con rendimiento de grano (RG) más alto y la mayor variabilidad a través de experimentos. Por el contrario, DK-697, H-440 y Tigre tuvieron RG estable

**Results**

The variance analysis of the AMMI model for grain yield (GR) showed significant differences ( $p \leq 0.05$ ) between environments, indicating that differences between the averages of this variation source contributed to differences in grain yield between maize genotypes. The contribution of the IGA effect to the sum of squares was greater than that of genotypes, demonstrating genotypic differences in response to test environments (Table 3). The analysis of the main components indicated that the first two main components were significant ( $p \leq 0.01$ ) and, together, explained 76.6% (CP1 56.2% and CP2 20.4%) of the total variation due to the interaction (data not included). The most stable hybrid with lower IGA showed values between -0.3 to 0.3 in the first major component (CP1) of the AMMI and it was DK-697 (Figure 1).

The environments (year\*date of sowing) farther from the origin were 2006A, 2006B, 2006C and 2007A; while the vectors closest to origin corresponded to 2008B and 2008C (Table 2, Figure 2). Hybrids furthest from the center of the biplot graphic (H-437 and G-8222) had the highest grain yield (RG) and highest variability through experiments. In contrast, DK-697, H-440 and Tiger had stable RG as

al ubicarse más cerca del origen del biplot (Figura 2). El ASS indicó que peso de mazorca (PM), altura de planta (AP), relación altura de planta mazorca (RAPM) y número de mazorcas sanas (NMS) son variables de primer orden para RG, debido que explicaron 86% de la varianza total del RG de los híbridos evaluados; con presencia de colinealidad moderada para todas las variables medidas, con efectos fuertes por ejemplo del número de mazorcas sanas (NMS) (VIF= 1.41) y peso de mazorca (PM) (VIF= 1.19) (Cuadro 4).

they were located closer to the origin of the biplot graphic (Figure 2). The ASS indicated that cob weight (PM), plant height (AP), height plant-cob ratio (RAPM) and number of healthy cobs (NMS) are first order variables for RG because they explained 86% of the total variance of the RG of the evaluated hybrids; in addition to the presence of moderate colinearity for all the variables measured, with strong effects, for example, on the number of healthy cobs (FV= 1.41) and cob weight (FV= 1.19) (Table 4).

**Cuadro 3. Cuadrados medios de análisis de varianza del rendimiento de grano de híbridos de maíz sembrados en años y fechas de siembra en Río Bravo, Tamaulipas.**

**Table 3. Average squares of the analysis of variance of grain yield of maize hybrids planted in years and dates of planting in Río Bravo, Tamaulipas.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Repeticiones	3	1.36901 ns
Ambientes (A)	11	14.94917**
Híbridos (G)	7	29.32603**
Interacción G*A	77	1.21481**
AMMI 1	17	5.41886
AMMI 2	15	1.34394
AMMI 3	13	0.9555
Modelo	98	4.4677**
Error	285	0.8485
CV (%)	19.5	

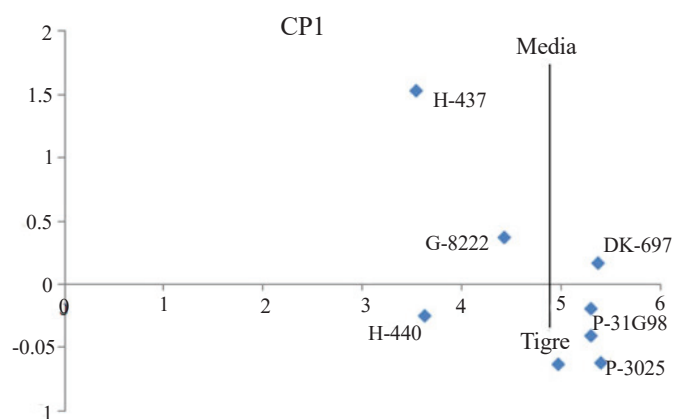
CV= coeficiente de variación; ns= no significativo; \*= significativo ( $p \leq 0.05$ ); \*\*= significativo ( $p \leq 0.01$ ).

**Cuadro 4. Efectos directos de variables predictoras del rendimiento de grano (RG) y medidas de colinealidad en ocho híbridos de maíz cultivados en el norte de Tamaulipas, México.**

**Table 4. Direct effects of predictors of grain yield (GR) and measures of colinearity in eight maize hybrids grown in northern Tamaulipas, Mexico.**

Variable predictor	Efecto directo	Tolerancia	Valor de inflación de la varianza	p
Peso de mazorca	0.13	0.84	1.19	**
Peso total	0.05	0.85	1.18	**
Días a floración masculina	0.06	0.99	1.01	ns
Días a floración femenina	-0.02	0.99	1	ns
Altura de planta	0.38	0.98	1.01	*
Relación altura de planta/mazorca	-0.13	0.97	1.03	**
Número de mazorcas sanas	0.57	0.71	1.41	**
Número de mazorcas enfermas	-0.03	0.99	1	ns

ns= no significativo; \*significativo ( $p \leq 0.05$ ); \*\*= significativo ( $p \leq 0.01$ ).



**Figura 1. Dispersión de híbridos de maíz cultivados en el norte de Tamaulipas, México (2006-2008), con base en el rendimiento de grano ( $t\ ha^{-1}$ ) en el eje de las abscisas y el primer componente CP1 del AMMI.**

**Figure 1. Dispersion of maize hybrids grown in northern Tamaulipas, Mexico (2006-2008), based on grain yield ( $t\ ha^{-1}$ ) on the abscissa axis and the first component of AMMI.**

Las variables de primer y segundo orden demostraron que 32% de la variación total en peso de mazorca (PM) se explica con las variables días a floración masculina (DFM), días a floración femenina (DFF) y peso total (PT); mientras que 64% de la variación en el número de mazorcas sanas (NMS) se explica con el número de mazorcas enfermas (NME) y el peso de mazorca (PM) (Cuadro 5; Figura 3).

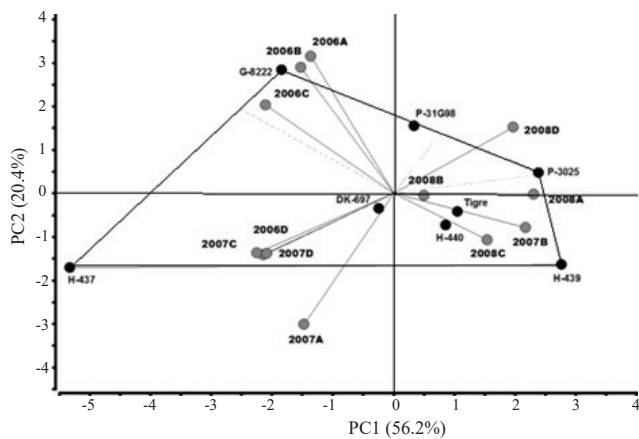
The first and second order variables showed that 32% of the total weight variation of cob (PM) is explained by the variables of days at male flowering (DFM), days at female flowering (DFF) and total weight (PT); while 64% of the variation in the number of healthy cobs (NMS) is explained by the number of sick cobs (NME) and the cob weight (PM) (Table 5, Figure 3).

**Cuadro 5. Efecto directo de variables predictoras de primer y segundo orden en el rendimiento de grano y colinealidad en ocho híbridos de maíz cultivados en el norte de Tamaulipas, México.**

**Table 5. Direct effect of first and second order predictors on grain yield and colinearity in eight maize hybrids grown in northern Tamaulipas, Mexico.**

Variable respuesta	Variable predictorora	R <sup>2</sup>	Efecto directo	Tolerancia	VIF	p
Rendimiento de grano	Peso de mazorca	0.86	0.13	0.84	1.19	**
	Altura de planta		0.38	0.98	1.02	*
	Relación altura de planta/mazorca		-0.13	0.97	1.03	**
	Número de mazorcas sanas		0.57	0.71	1.41	**
Peso de mazorca	Días a floración masculina	0.32	-0.11	0.95	1.06	*
	Días a floración femenina		0.33	0.95	1.02	**
	Peso total		0.13	0.99	1.01	*
Altura de planta	Número de mazorcas enfermas	-0.16	-0.34	0.88	1.14	**
	Peso total		0.13	0.97	1.03	**
Relación altura de planta/mazorca	Número de mazorcas enfermas	-0.11	-0.27	0.92	1.09	**
	Peso total		0.15	0.97	1.03	**
Número de mazorcas sanas	Número de mazorcas enfermas	0.64	0.18	0.98	1.01	*
	Peso total		0.56	0.72	1.39	**

ns= no significativo; \* = significativo ( $p \leq 0.05$ ); \*\* = significativo ( $p \leq 0.01$ ); VIF= valor de inflación de la varianza.



**Figura 2. Gráfico biplot de híbridos de maíz cultivados en el norte de Tamaulipas, México durante 2006-2008 con base en rendimientos de grano (RG).**

**Figure 2. Biplot graphic of maize hybrids grown in northern Tamaulipas, Mexico during 2006-2008 based on grain yields (GR).**

## Discussion

In this paper, differences in the agronomic behavior among the eight maize hybrids evaluated through the test environments, as a result of the combination of three years of evaluation and four planting dates, were observed, which reflects the influence of variable environmental conditions occurring during the experiments development. Significant effects between maize genotypes and test environments were previously reported (Fan *et al.*, 2007; Cargnelutti *et al.*, 2009; García *et al.*, 2009; Kandus *et al.*, 2010; Nemati *et al.*, 2010; Selvaraj and Ngarajan, 2011; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

The most stable hybrid with lower IGA was DK-697, according to the results of the two analysis strategies, AMMI and GGE Biplot. In addition, the latter strategy indicated that



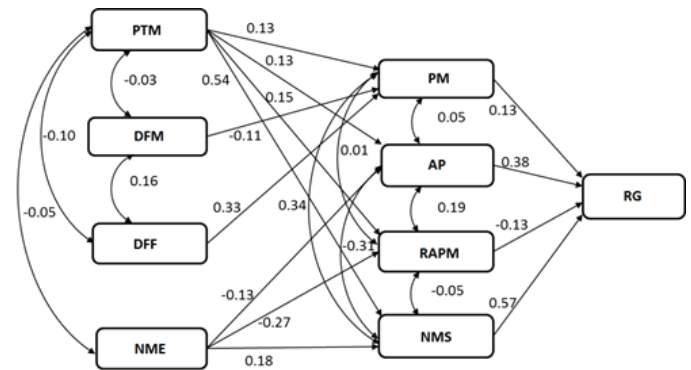
## Discusión

En este trabajo se observaron diferencias en el comportamiento agronómico entre los ocho híbridos de maíz evaluados a través de los ambientes de prueba, producto de la combinación de tres años de evaluación y cuatro fechas de siembra, lo que a su vez refleja la influencia de las condiciones ambientales variables ocurridas durante el desarrollo de los experimentos. Efectos significativos entre genotipos de maíz y ambientes de prueba se han consignado previamente (Fan *et al.*, 2007; Cargnelutti *et al.*, 2009; García *et al.*, 2009; Kandus *et al.*, 2010; Nemati *et al.*, 2010; Selvaraj y Ngarajan, 2011; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

El híbrido más estable y con menor IGA fue DK-697, de acuerdo con los resultados de las dos estrategias de análisis, el AMMI y el GGE Biplot. Además, ésta última estrategia indicó que tres ambientes de 2006 y uno de 2007 contribuyeron en menor proporción a la interacción genotipo x ambiente y por ende exhibieron mejor capacidad para discriminar genotipos. Dichos ambientes ofrecieron mejores condiciones ambientales en virtud de que consignan los mayores promedios de lluvias. Por el contrario, dos ambientes de 2008 tuvieron la menor interacción ambiental dado que muestran mayores temperaturas que afectaron por igual al germoplasma evaluado.

Aunque Balestre *et al.* (2009) y Luenzzo-De Oliveira *et al.* (2010) coinciden en señalar que el modelo AMMI es en general más preciso para evaluar la adaptabilidad y estabilidad de germoplasma de maíz con base en rendimiento de grano, en este trabajo se observó que ambas estrategias coincidieron en identificar al híbrido más estable, DK-697, tal como también lo indican Mitrovic *et al.* (2012). Por el contrario, Yan *et al.* (2007) mencionan que, no obstante ambos métodos combinan los efectos del genotipo y de la interacción genotipo\*ambiente en el análisis de mega-ambientes, el GGE biplot es superior al AMMI pues explica mejor los efectos genotípicos y de la interacción y tiene la propiedad del ‘producto interno’ del biplot, así como su poder de discriminación vs la visión de representatividad. Por ello, consideramos que la combinación de ambas estrategias mejorarían la eficiencia en el proceso de evaluación de la estabilidad del rendimiento en germoplasma de maíz, con la ventaja de que el GGE biplot además aportaría información para caracterizar y estratificar ambientes de prueba y reducir el número de experimentos o sitios de prueba hasta en 70%

three environments from 2006 and one from 2007 contributed in less proportion to genotype x environment interaction and therefore exhibited better ability to discriminate genotypes. These environments offered better environmental conditions because they recorded the highest rainfall averages. In contrast, two environments in 2008 had the lowest environmental interaction since they showed higher temperatures that equally affected the evaluated germplasm.



**Figura 3. Análisis de sendero secuencial indica las interrelaciones de las características que contribuyen al rendimiento de grano de ocho híbridos de maíz cultivados en el norte de Tamaulipas, México.** PM= peso de mazorca; PTM= peso total de mazorca; DFM= días a floración masculina; DFF= días a floración femenina; AP= altura de planta, RAPM= relación altura de planta/mazorca; NMS= número de mazorcas sanas; NME= número de mazorcas enfermas; RG= rendimiento de grano.

**Figure 3. Sequential trail analysis that indicates the interrelations of the characteristics that contribute to grain yield of eight maize hybrids grown in northern Tamaulipas, Mexico.** PM= cob weight; PTM= total cob weight; DFM= days at male flowering; DFF= days at female flowering; AP= plant height, RAPM= cob/plant height ratio; NMS= number of healthy cobs; NME = number of sick cobs; RG= grain yield.

Although Balestre *et al.* (2009) and Luenzzo-De Oliveira *et al.* (2010) agree that the AMMI model is generally more accurate to evaluate the adaptability and stability of maize germplasm based on grain yield, in this paper it was observed that both strategies coincided in identifying the most stable hybrid, DK-697, as also indicated by Mitrovic *et al.* (2012). On the contrary, Yan *et al.* (2007) mention that, although both methods combine the effects of genotype and genotype\*environment interaction in the mega-environment analysis, GGE biplot is superior to AMMI because it better explains the genotypic and interaction effects and has the property of the biplot ‘internal product’, as well as its power of discrimination vs. the vision of representativeness.

(Mitrovic *et al.*, 2012) con el consiguiente ahorro de tiempo, dinero y trabajo sin pérdida de eficiencia y precisión de la evaluación.

Las variables peso de mazorca, altura de planta, relación altura de planta/mazorca y número de mazorcas sanas se identificaron como variables directamente asociadas con el rendimiento de grano del maíz (variables de primer orden), además de colinealidad entre todas las variables medidas, con efectos fuertes en número de mazorcas sanas y peso de mazorca. Estudios previos indican que la selección de germoplasma de maíz superior en rendimiento de grano se basa en la consideración de caracteres como el número de granos por mazorca, tamaño del grano o número de mazorcas por planta, estrecha y positivamente asociados con el rendimiento del maíz (Agrama, 1996; Mohammadi *et al.*, 2003; Nemati *et al.*, 2009; Jamshidian *et al.*, 2013). Jamshidian *et al.* (2013); Rashidi *et al.* (2013) incluso observaron asociaciones directas positivas de los contenidos de proteína con el peso del grano y de la mazorca.

El uso conjunto de las estrategias AMMI, GGE biplot y análisis de sendero secuencial se han aplicado para evaluar la significancia y magnitud del efecto de la interacción genotipo x ambiente; así como para identificar las relaciones entre el rendimiento de grano y los componentes del rendimiento en cultivos como la soya [*Glycine max* (L.) Merr.] (Ascencio-Luciano *et al.*, 2013). También, se han aplicado en la caracterización de la respuesta a la sequía en trigo (*Triticum aestivum* L.) (Farshadfar *et al.*, 2012). Dichos modelos son buenas herramientas estadísticas para la evaluación, caracterización y selección de germoplasma con base en su comportamiento en ambientes variables (Tai y Tarn, 2003), de modo que el mejoramiento genético del maíz por rendimiento de grano será eficiente al considerar las variables altamente asociadas con el rendimiento de grano para el correcto diseño y uso de índices de selección en mega-ambientes.

## Conclusiones

En este trabajo, la combinación del modelo AMMI, el GGE biplot y análisis de sendero secuencial (ASS) permitió la identificación de germoplasma de maíz con estabilidad del rendimiento de grano y rendimiento de grano promedio alto (DK-697), así como la identificación de características estrechamente asociadas con el rendimiento de grano (peso de mazorca, altura de planta, relación altura de planta/

Therefore, we consider that the combination of both strategies would improve efficiency in the process of evaluating the yield stability in maize germplasm with the advantage that the biplot GGE would also provide information to characterize and stratify test environments therefore reducing the number of experiments or test sites up to 70% (Mitrovic *et al.*, 2012) with the consequent saving of time, money and work without loss of efficiency and accuracy of the evaluation.

The variables cob weight, plant height, plant height/cob ratio and number of healthy cobs were identified as variables directly associated with maize grain yield (first order variables), in addition to colinearity among all measured variables, with strong effects on the number of healthy cobs and cob weight. Previous studies indicate that the selection of higher maize germplasm in grain yield is based on the consideration of characters such as the number of grains per cob, grain size or number of cobs per plant, closely and positively associated with maize yield (Agrama, 1996; Mohammadi *et al.*, 2003; Nemati *et al.*, 2009; Jamshidian *et al.*, 2013). Jamshidian *et al.* (2013); Rashidi *et al.* (2013) even observed direct positive associations of protein contents with grain and cob weight.

The joint use of AMMI, GGE biplot and sequential pathway analysis strategies have been applied to evaluate the significance and magnitude of the effect of the genotype x environment interaction; as well as to identify the relationships between grain yield and yield components in crops such as soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] (Ascencio-Luciano *et al.*, 2013). Also, they have been applied in the characterization of the response to wheat drought (*Triticum aestivum* L.) (Farshadfar *et al.*, 2012). These models are good statistical tools for the evaluation, characterization and selection of germplasm based on their behavior in variable environments (Tai and Tarn, 2003), so that the genetic improvement of maize by grain yield will be efficient considering the highly associated variables with grain yield for the correct design and use of selection indexes in mega-environments.

## Conclusions

In this paper, the combination of AMMI model, GGE biplot and sequential trail analysis (ASS) allowed the identification of maize germplasm with grain yield stability and high average grain yield (DK-697), as well as the identification

mazorca y número de mazorcas sanas) de híbridos de maíz cultivados en diferentes años y fechas de siembra en el norte de Tamaulipas, México.

of characteristics closely associated with grain yield (cob weight, plant height, plant height/cob ratio and number of healthy cobs) of maize hybrids grown in different years and planting dates in northern Tamaulipas, Mexico.

## Literatura citada

- Ascencio, L. G.; Maldonado, M. N.; García, J. G. and Gill-Langarica, H. R. 2013. AMMI and sequential path analyses of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] experimental lines in a breeding program in the Mexican tropics. *Aust. J. Crop Sci.* 7:1772-1779.
- Balestre, M.; García, Von P. R.; Souza, J. and Luenzzo, De O. R. 2009. Genotypic stability and adaptability in tropical maize based on AMMI and GGE biplot analysis. *Gen. Mol. Res.* 8:1311-1322.
- Burgueño, J.; Crossa, J. and Vargas M. 2002. SAS programs for graphing GE and GGE biplots. Biometrics and statistics Unit, CIMMYT, México. <http://www.cimmyt.org/ru/programs-and-units/units-a-labs/crop-research-informatics-laboratory/disciplinary-groups-units/biometrics-and-statistics-unit>.
- Cargnelutti, F. A.; Storck, L.; Riboldi, L. S.; Guadagnin, J. P. 2009. Association between adaptability and stability methods in corn. *Ciencia Rural.* 39:340-347.
- Crossa, J.; Gauch, H. G. and Zobel, R. W. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Sci.* 30:493-500.
- Fan, X. M.; Kang, M. S.; Chen, H.; Zhang, Y.; Tan, J. and Xu, C. 2007. Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agron. J.* 99:220-228.
- Farshadfar, E.; Rasoli, V.; Mohammadi, R. and Veisi, Z. 2012. Path analysis of phenotypic stability and drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Plant Breed.* 6:106-112.
- García, P. J.; Cabrera, S. R.; Pérez, A. A.; Silva, R. J.; Álvarez, R. M.; Marín, C. A.; Monasterio, P. P. y Santella, M. D. 2009. Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivos de maíz de endospermo normal y QPM en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agron. Trop.* 59:433-443.
- González, M. J.; López, S. J. A.; Briones, E. F.; Varela, F. S. E.; Reyes, M. C. A. y Pecina, M. J. A. 2014. Programa de manejo, conservación y mejoramiento de maíz nativo de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. *Investigación y Ciencia.* 62:76-83.
- Jamshidian, P.; Reza, G. A.; Reza, N. M. and Darkhal, H. 2013. Phenotypic correlations and path analysis between ear yield and other associated characters in corn hybrids (*Zea mays* L.). *Int. J. Farming Allied Sci.* 2:1273-1276.
- Kandus, M.; Almorza, D.; Boggio, R. R. and Salerno, J. C. 2010. Statistical models for evaluating the genotype-environment interaction in maize (*Zea mays* L.). *Phyton. Int. J. Exp. Bot.* 79:39-46.
- Kozak, M. and Antunes, A. R. 2014. Sequential path analysis: what does 'sequential' mean? *Scientia Agricola.* 71:525-527.
- Lozano, R. A.; Santacruz, V. A.; San Vicente, G. F.; Crossa, J.; Burgueño, J. and Molina, G. J. D. 2015. Modelación de la interacción genotipo\*ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Rev. Fitotec. Mex.* 38:337-347.
- Luenzzo, De O. R.; García, Von, P. R.; Balestre, M. and Ferreira, D. V. 2010. Evaluation of maize hybrids and environmental stratification by the methods AMMI and GGE biplot. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 10:247-253.
- CIBCEC (Cédulas de Información Básica para Centros Estratégicos Comunitarios). 2006. Microrregión 3 Cintalapa, Chiapas, SEDESOL. [www.microrregiones.gob.mx](http://www.microrregiones.gob.mx).
- Agrama, H. A. S. 1996. Sequential path analysis of grain yield and its components in maize. *Plant Breed.* 115:343-346.
- Ángeles, A. H. 2000. Mejoramiento genético del maíz en México: el INIA, sus antecesores y un vistazo a su sucesor, el INIFAP. *Agric. Téc. Méx.* 26:31-48.
- Márquez, S. F. 1991. Genotecnia vegetal: métodos, teoría, resultados. AGT Editor. México. Vol. 3. 500 p.
- Mitrovic, B.; Stanisavjevi, D.; S. Treski, S.; Stojakovic, M.; Ivanovic, M.; Bekavac, B. and Rajkovic, M. 2012. Evaluation of experimental maize hybrids tested in multi-location trials using AMMI and GGE biplot analyses. *Turk. J. Field Crops.* 17:35-40.
- Mohammadi, S. A.; Prasanna, B. M. and Singh, N. N. 2003. Sequential path model for determining interrelationships among grain yield and related characters in maize. *Crop Sci.* 43:1690-1697.
- Nemati, A.; Sedghi, M.; Sharifi, R. F. and Seidi, M. M. 2009. Investigation of correlation between traits and path analysis of corn (*Zea mays* L.) grain yield at the climate of Ardabil region (northwest Iran). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 37:194-198.
- Rashidi, N.; Reza, G. A.; Reza, N. M. and Darkhal, H. 2013. Evaluation of attributes association and path coefficients for ear yield in maize hybrids (*Zea mays* L.). *Int. J. Farming Allied Sci.* 2:1033-1036.
- Reyes, M. C. A. y Cantú, A. M. A. 2006. Maíz. In: Rodríguez-del Bosque, L. A. (Ed.). 50 Años de Investigación Agropecuaria en el Norte de Tamaulipas, historia, logros y retos. INIFAP. Campo Experimental Río Bravo. Tamaulipas, México. Libro técnico núm. 1. 325 p.
- Selvaraj, C. I. and Nagarajam, P. 2011. Interrelationship and path-coefficient studies for qualitative traits, grain yield and other attributes among maize (*Zea mays* L.). *Int. J. Plant Breed. Gen.* 5:209-223.
- SIAP. 2016. Estadísticas de producción para el año agrícola 2014. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [www.siap.gob.mx/index](http://www.siap.gob.mx/index).
- Tai, G. C. C. and Tarn, T. R. 2003. Evaluation of varieties: genotypes, environments and genotype-environment interactions. *Acta Hort.* 619:31-34.
- Vargas, H. M. y Crossa, J. 2000. El análisis AMMI y la gráfica del biplot en SAS. Unidad de biometría. CIMMYT, México. [www.cimmyt.org/biometrics](http://www.cimmyt.org/biometrics).
- Williams, W. A.; Demment, M. W. and Jones, J. N. 1990. Concise table for path analysis statistics. *Agron. J.* 82:1022-1024.
- Whittaker, A.; Vazzana, C.; Vecchio, V. and Benedettelli, S. 2009. Evaluation of direct and indirect effects of flavonoids, mineral elements and dry weight on antiradical scavenging activity in leaf material of field-grown *Trifolium pratense* cultivars using path analysis. *Field Crops Res.* 113:1-11.

End of the English version



Yan, W.; Hunt, L. A.; Sheng, Q. and Szlavics, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Sci.* 40:597-605.

Yan, W.; Kang, M. S.; Ma, B.; Woods, S. and Cornelius, P. L. 2007. GGE Biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.* 47:641-653.