

INTERACCIÓN GENOTIPO × AMBIENTE Y ESTABILIDAD EN RENDIMIENTO DE VARIEDADES DE MAÍZ EN CONDICIONES CONTRASTANTES DE FÓSFORO

GENOTYPE × ENVIRONMENT INTERACTION AND YIELD STABILITY OF MAIZE VARIETIES UNDER CONTRASTING PHOSPHORUS CONDITIONS

Iván Ochoa-Cadavid¹, Ricardo E. Preciado-Ortíz², Jeannette S. Bayuelo-Jimenez^{3*}

¹Subdirección de Investigación y Desarrollo, Unipalma de los Llanos S.A., Hacienda Santa Bárbara, Km 25, vía Cumaral-Veracruz, Meta, Colombia. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km 6.5 Carretera Celaya, 38110, San Miguel de Allende, Celaya, Guanajuato, México. ³Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Km 9.5, Carretera Morelia-Zinapécuaro. 58880. Tarímbaro, Michoacán, México. (bayuelo@umich.mx).

RESUMEN

La baja productividad del maíz (*Zea mays* L.) en la Meseta P'urhépecha, México, se debe a las condiciones de acidez del suelo y la deficiencia de fósforo. Para aumentar la productividad es necesario desarrollar variedades estables con rendimiento alto en suelos ácidos. El objetivo de este estudio fue estimar el efecto de la interacción genotipo por ambiente (IGA) sobre el rendimiento de maíz y su grado de estabilidad en diferentes condiciones agroecológicas. Se evaluó el rendimiento de 25 genotipos de maíz nativo y dos testigos, cultivados en cinco localidades de la Meseta P'urhépecha, en suelos ácidos con deficiencia de fósforo y con dosis de fertilización reducida (BP) (25 kg P₂O₅ ha⁻¹) y alta (AP) (50 kg P₂O₅ ha⁻¹). Los métodos de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI, siglas en inglés) y de regresión en los sitios (SREG) se usaron para estudiar la interacción genotipo × ambiente (IGA) y definir ambientes que discriminen mejor a los genotipos y que permitan el agrupamiento de ambientes y genotipos. El análisis AMMI identificó a las localidades de Erongarícuaro en ambientes de AP (ERA) y BP (ERB) como las de mayor interacción y a los genotipos Paso del Muerto 1 [109], Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho II-04 [230], Macho-I-04 [236] y el criollo de la región [242], como los más estables y con buen rendimiento en AP y BP. El método SREG determinó el desempeño relativo de los genotipos en un ambiente específico e identificó los mejores genotipos a través de ambientes con características semejantes. Con base en el valor de estabilidad AMMI (ASV) e índice

ABSTRACT

The low productivity of maize (*Zea mays* L.) on the P'urhépecha Plateau, Mexico, is caused by soil acidity and phosphorus deficiency. To increase productivity, it is necessary to develop high-yielding varieties that are stable in acid soils. The objective of this study was to estimate the effect of the interaction genotype x environment (IGA) on maize yield and its degree of stability in different agroecological conditions. We assessed yield of 25 native maize genotypes and two controls cultivated in five localities of the P'urhépecha Plateau with acid soils deficient in phosphorus fertilized with low (BP) (25 kg P₂O₅ ha⁻¹) and high (AP) (50 kg P₂O₅ ha⁻¹) dosages of fertilization. The Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) and the site regression (SREG) methods were used to study the interaction genotype x environment (IGA) and define environments that better discriminate genotypes and allow grouping of environments and genotypes. The AMMI analysis identified the localities of Erongarícuaro in the environments of AP (ERA) and BP (ERB) as the greatest interaction and the genotypes Paso del Muerto 1 [109], Santa Clara [115], DP x Tromba [127], Macho II-04 [230], Macho-I-04 [236], and the local race as the most stable with good yield in AP and BP. The SREG method determined the relative performance of the genotypes in a specific environment and identified the best genotypes across environments with similar characteristics. Based on the AMMI stability value (ASV) and the genotype selection index (GSI), the most stable genotypes with the highest grain yield in the environments assessed were DP x Tromba [127], Macho-I-04 [236] and Santa Clara [115]. These genotypes exhibited phenotypical stability for yield in acid soils deficient in phosphorus.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2018. Aprobado: septiembre, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 53: 337-353. 2019.

de selección de genotipos (GSI, por sus siglas en inglés), los genotipos más estables y con mayor rendimiento de grano en los ambientes evaluados fueron DP × Tromba [127], Macho-I-04 [236] y Santa Clara [115]. Estos genotipos mostraron estabilidad fenotípica para rendimiento en suelos ácidos con deficiencia de fósforo.

Palabras clave: *Zea mays*, rendimiento de grano, interacción Genotipo × Ambiente, AMMI, SREG.

INTRODUCCIÓN

En México, el estado de Michoacán ocupa el quinto lugar en superficie sembrada (468 553 ha) y el cuarto lugar en producción de grano (1 295 926 Mg), con una media de rendimiento de 4 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2017). El 70 % de la superficie cultivada en el estado se siembra con variedades nativas y el restante con variedades mejoradas (Eakin *et al.*, 2014). La diversidad de maíces en la entidad incluye 27 de las 59 razas reportadas en México (Orozco-Ramírez *et al.*, 2017). En la Meseta P'urhépecha, también existe una alta riqueza de variedades y un alto potencial para la producción de maíz (Mijangos-Cortés *et al.*, 2007), pero las condiciones climáticas, la acidez del suelo y la deficiencia de fósforo son responsables de los bajos rendimientos de grano (<2.5 Mg ha⁻¹) (Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2014; González-Esquivel *et al.*, 2015). Los suelos presentan propiedades ándicas, resultantes de la presencia de materiales amorfos como el alófono, imogolita, ferrihidrita y complejos de aluminio-humus (Alcalá *et al.*, 2001). Estos materiales exhiben alta superficie específica y abundantes sitios reactivos para la retención de fosfatos (33 a 85 %) que reducen la recuperación del fertilizante aplicado (10-25 %) (Van de Wiel *et al.*, 2017). El mantenimiento de la capacidad productiva de estos suelos requiere del uso eficiente de fertilizantes que permita un manejo adecuado de la concentración de fósforo para optimar el crecimiento del cultivo y restituir el que se extrae a la cosecha (Setiyono *et al.*, 2010). En los sistemas agrícolas tradicionales de esta región, la dosis de fertilizante aplicado (<50 kg ha⁻¹ de P₂O₅) (Astier *et al.*, 2006; Speelmann *et al.*, 2006) es insuficiente para alcanzar una óptima concentración de P disponible en el suelo (< 2 mg kg⁻¹; Bray 1) y la deficiencia de dicho elemento provoca una marcada reducción del crecimiento de la planta y por consiguiente, un bajo rendimiento

Key words: *Zea mays*, grain yield, interaction Genotype × Environment, AMMI, SREG.

INTRODUCTION

In Mexico, the state of Michoacán occupies fifth place in area cultivated (468 553 ha) and fourth place in grain production (1 295 926 Mg) of maize, with a mean yield of 4 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2017). Of the state's cultivated area, 70 % is planted with native varieties and the rest with improved varieties (Eakin *et al.*, 2014). The diversity of maize in the state includes 27 of the 59 races reported for Mexico (Orozco-Ramírez *et al.*, 2017). On the P'urhépecha Plateau there is also a wealth of varieties and high potential for maize production (Mijangos-Cortés *et al.*, 2007), but the conditions of climate, soil acidity and phosphorus deficiency are responsible for low grain yields (<2.5 Mg ha⁻¹) (Bayuelo-Jiménez and Ochoa-Cadavid, 2014; González-Esquivel *et al.*, 2015). The soils have andic properties, resulting from the presence of amorphous materials such as allophane, imogolite, ferrihydrite and aluminum-humus complexes (Alcalá *et al.*, 2001). These materials exhibit high specific area and abundant reactive sites for the retention of phosphates (33 to 85%) that reduce recovery of applied fertilizers (10-25 %) (Van de Wiel *et al.*, 2017). Maintaining the productive capacity of these soils requires the efficient use of fertilizers for adequate management of the phosphorus concentration to optimize crop growth and restitute P extracted at harvest (Setiyono *et al.*, 2010). In traditional agricultural systems of this region, the fertilizer dosage applied (<50 kg ha⁻¹ de P₂O₅) (Astier *et al.*, 2006; Speelmann *et al.*, 2006) is insufficient to reach an optimal concentration of available P in the soil (< 2 mg kg⁻¹; Bray 1), and the deficiency of this element causes a marked reduction in plant growth and, consequently, low grain yield (<2 Mg ha⁻¹) (Astier *et al.*, 2006). Increasing production in these conditions is feasible if varieties are selected for their attributes of phosphorus use efficiency and stability (EUP; crop yield per unit of nutrient supplied by soil and fertilizer) Wang *et al.*, 2010). In this region, under limited rainfed and residual moisture conditions, the best maize varieties yield 3.5 to 4.0 Mg ha⁻¹ on average (Bayuelo-Jiménez and Ochoa-Cadavid, 2014; Bayuelo-Jiménez and Ochoa-Cadavid, 2018).

de grano ($<2 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Astier *et al.*, 2006). Elevar la producción en estas condiciones es factible a partir de variedades seleccionadas por sus atributos de eficiencia y estabilidad en el uso de fósforo (EUP; rendimiento del cultivo por unidad de nutriente suministrado del suelo y del fertilizante) (Wang *et al.*, 2010). En esta región, bajo condiciones de temporal limitado y humedad residual, las mejores variedades de maíz rinden en promedio de 3.5 a 4.0 Mg ha^{-1} (Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2014; Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2018).

El desarrollo de nuevas variedades de maíz con alto potencial de rendimiento y calidad del grano, deseable para diferentes regiones, es una meta importante de las investigaciones que pueden conducir al éxito en la obtención de un genotipo estable. La adaptabilidad varietal a las fluctuaciones ambientales es importante para estabilizar la producción de cultivos en regiones y años. El rendimiento es un carácter cuantitativo complejo que en gran medida está influenciado por las variaciones ambientales; la selección de genotipos superiores con base en el rendimiento de grano *per se* en una localidad en un año puede no ser muy eficaz; por lo tanto, la evaluación de genotipos para determinar su estabilidad en rendimiento bajo diferentes condiciones del medio es esencial en los programas de mejoramiento genético. La comprensión de las causas de la interacción genotipo por ambiente (IGA) puede ayudar a identificar ambientes y variedades de mayor estabilidad (Farshadfar *et al.*, 2011).

Hay metodologías que explican la IGA desde una perspectiva multivariada y las más utilizadas son el modelo de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (AMMI) (Gauch, 2006) y el análisis de regresión en los sitios (SREG) que estima el efecto de genotipos combinado con el efecto de la interacción genotipo por ambiente ($G + G \times A$) (Yan *et al.*, 2000; Yan y Tinker, 2006). Ambos modelos permiten estimar estabilidad, evaluar localidades y clasificar ambientes por medio de una gráfica bidimensional (biplot) de genotipos y ambientes (Gauch *et al.*, 2008). La efectividad de ambas metodologías en la descripción de la IGA ha sido demostrada en maíz nativo (Arellano *et al.*, 2014; Martínez-Sánchez *et al.*, 2016) e híbridos de maíz (Vázquez *et al.*, 2012; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

Development of new maize varieties with high potential for yield and grain quality, desirable for different regions, is an important research goal that can lead to success in obtaining a stable genotype. Varietal adaptability to climate fluctuations is important to stabilize crop production over regions and years. Yield is a complex quantitative trait that is largely influenced by environmental variations. Selection of superior genotypes based on grain yield *per se* in a given location in a given year may not be very effective. Therefore, evaluation of genotypes to determine their yield stability under different conditions of the environment is essential in breeding programs. Understanding the causes of the interaction genotype x environment (IGA) can help to identify more stable environments and varieties (Farshadfar *et al.*, 2011).

There are methodologies that explain IGA from a multivariate perspective and the most commonly used are the model of Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) (Gauch, 2006) and Site Regression analysis (SREG) that estimate the combined effect of genotypes with the effect of the interaction genotype x environment ($G + G \times A$) (Yan *et al.*, 2000; Yan and Tinker, 2006) using a bidimensional graph (biplot) of genotypes and environments (Gauch *et al.*, 2008). The effectiveness of the two methodologies in the description of IGA has been demonstrated in native maize (Arellano *et al.*, 2014; Martínez-Sánchez *et al.*, 2016) and in hybrid maize (Vázquez *et al.*, 2012; Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

Stability characterization of the genotypes evaluated in different sites and years has also been achieved using regression parameters (Eberhart and Russel, 1966), variance of stability (Shukla, 1972), AMMI stability value (ASV) (Purchase *et al.*, 2000), and genotype selection index (GSI), which combines the values of ASV ranking and average yield to estimate stability (Farshadfar, 2008).

The objective of this study was to estimate the effects of the interaction genotype x environment on yield of 27 maize genotypes and their degree of stability in different agroecological conditions of the P'urhépecha Plateau.

La caracterización de la estabilidad de los genotipos evaluados en diferentes sitios y años también se ha logrado por medio de parámetros de regresión (Eberhart y Russel, 1966), varianza de estabilidad (Shukla, 1972), valor de estabilidad de AMMI (ASV, siglas en inglés) (Purchase *et al.*, 2000) y el índice de selección de genotipos (GSI, siglas en inglés), que combina los valores del ordenamiento del ASV y rendimiento promedio para estimar su estabilidad (Farshadfar, 2008).

El objetivo de este estudio fue estimar los efectos de la interacción genotipo por ambiente en el rendimiento de 27 genotipos de maíz y su grado de estabilidad en diferentes condiciones agroecológicas de la Meseta P'urhépecha.

MATERIALES Y MÉTOS

Ubicación de los experimentos y material genético

La región de estudio está en el centro del Eje Neovolcánico, en el estado de Michoacán. Los experimentos fueron conducidos durante el periodo de primavera-verano de 2014 en los municipios de Erongarícuaro (incluye el sitio de Charahuén), Tingambato (localidad Pichátaro), Charapan y Nahuátzen. El clima es templado sub-húmedo con lluvias en verano. La precipitación promedio total fluctúa de 1100 y 1200 mm anuales. La temperatura media anual oscila de 14 a 16 °C, con mínima promedio de 12.3 °C y máxima > 19 °C, de acuerdo con las normales climatológicas de las estaciones activas más cercanas a los sitios de estudio (SMN, 2010). En el Cuadro 1 se muestran las características ambientales y fisicoquímicas del suelo.

Los experimentos incluyeron dos niveles de fertilización en cada localidad definiéndose 10 ambientes; con dosis baja (25 kg ha⁻¹) y alta (AP) (50 kg ha⁻¹) de P₂O₅ como superfosfato de calcio triple. Se usaron 25 genotipos de maíz provenientes del programa de mejoramiento del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) e integrados por variedades de la Meseta P'urhépecha: seis nativas, nueve variedades mejoradas, cinco cruces entre un híbrido por criollo y cinco sintéticos, así como maíces mejorados de amplia base genética, más dos testigos (cv. Ocelote y un genotipo de maíz nativo de la región).

Diseño y unidad experimental

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con cuatro repeticiones, donde los niveles de P correspondieron a la parcela principal y los genotipos,

MATERIALS AND METHODS

Location of the experiments and genetic material

The study region is in the center of the Neovolcanic Belt in the state of Michoacán. The experiments were conducted during the spring-summer of 2014 in the municipalities of Erongarícuaro (including the Charahuén site), Tingambato (Pichátaro locality), Charapan and Nahuátzen. The climate is temperate sub-humid with summer rains. Average total annual precipitation fluctuates between 1100 and 1200 mm. Mean annual temperature oscillates between 14 and 16 °C, with an average low of 12.3 °C and high > 19 °C, according to the climatological normals of the active stations closest to the study sites (SMN, 2010). Table 1 shows environmental and soil physicochemical characteristics.

The experiments included two levels of fertilization at each site and ten environments were defined: low (25 kg ha⁻¹) and high (AP) (50 kg ha⁻¹) dosage of P₂O₅ as triple calcium superphosphate. Twenty-five maize genotypes from the breeding program of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas and Pecuarias (INIFAP) were used and integrated by varieties from the P'urhépecha Plateau: six native varieties, nine improved varieties, five crosses between a hybrid and a local race, and five synthetic varieties, as well as improved maize with broad genetic base, plus two controls (cv. Ocelote and a maize genotype native to the region).

Experimental design and experimental unit

The experimental design was complete random blocks with a divided plot arrangement and four replications. The levels of P corresponded to the main plot and the genotypes distributed within each main plot were the sub-plots. Each experimental unit consisted of two rows 5 m long and 0.60 m wide. Population density was 70 000 plants ha⁻¹. Seeds were planted 6 cm deep leaving 25 cm between plants. A dosage of 60 kg N ha⁻¹ se was applied in the form of urea at sowing, and 60 kg N ha⁻¹ 42 d after sowing.

Response variable and statistical analysis

Yield was assessed as grain dry weight adjusted to 14 % moisture, converted to Mg ha⁻¹ considering the proportion of grain of the ear and the factor that extrapolates it to an area of 1 ha. The original data were subjected to the normality tests of Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov and variance homogeneity using the Bartlett tests (SAS Institute, 2000). To determine the influence of genetic variance and of environmental factors and their interaction, a double-classification analysis of

Cuadro 1. Características ambientales y fisicoquímicas del suelo en las localidades de estudio.
Table 1. Environmental and soil physicochemical characteristics of the study sites.

Variables	Charahuén ^a (CH)	Erongarícuaro ^a (ER)	Charapan ^b (CP)	Pichátaro ^b (PI)	Nahuátzen ^b (NA)
Latitud	19° 39' N;	19° 35' N	19° 39' N	19° 30' N	19° 39' N
Longitud	102° 15' O	101° 43' O	102° 15' O	101° 51' O	101° 54' O
Altitud (msnm)	2098	2084	2360	2350	2300
Precipitación (mm)	1010.7	1000.2	961	1098	1045.3
Temperatura °C [†]	25.7-16.9	25.7-16.9	23.5-10.4	24.8-7.2	23.8-15.1
Arena (%)	55.1	49.8	63.8	55.1	63.1
Arcilla (%)	7.3	15.9	7.3	7.3	7.2
Limo (%)	37.6	34.5	29.6	37.6	29.6
pH (1:2 agua)	6.0 MoAc	6.5 MoAc	5.2Ac	5.9Ac	5.8Ac
Materia orgánica (%)	2.6A	3.2 A	2.7A	2.6 A	2.1MoA
P-Bray (mg kg ⁻¹)	3.2MuB	7.5 MoB	1.3 MuB	1.2 MuB	5.5 MuB

[†]Temperatura máxima y mínima; ^aEstación 00016087, Pátzcuaro, Michoacán; ^bEstación 00016032, Charapan, Michoacán; ^cEstación 00016253, Tanaco, Cherán, Michoacán; MoA=moderadamente ácido; Ac=ácido; MuA=muy alto; A=alto; MoA=moderadamente alto; M=mediano; MuB=muy bajo; MoB=moderadamente bajo. ♦ [†]High and low temperatures; ^aStation 00016087, Pátzcuaro, Michoacán; ^bStation 00016032, Charapan, Michoacán; ^cStation 00016253, Tanaco, Cherán, Michoacán; MoA = moderately acid; Ac = acid; MuA= very high; A = high; MoA = moderately high; M = medium; MuB = very low; MoB = moderately low.

distribuidos dentro de cada parcela principal, correspondieron a las sub-parcelas. Cada unidad experimental consistió de dos surcos de 5 m de longitud y 0.60 m de ancho. La densidad de población fue de 70 000 mil ha⁻¹. Las semillas se sembraron a 6 cm de profundidad a una distancia de 25 cm entre plantas. Una dosis de 60 kg N ha⁻¹ se aplicó en forma de urea a la siembra y 60 kg N ha⁻¹ 42 d después de la siembra.

Variable de respuesta y análisis estadístico

Se evaluó el rendimiento, representado por el peso seco del grano ajustado a 14 % de humedad, convertido a Mg ha⁻¹ considerando la proporción de grano en la mazorca y el factor que lo extrapola a la superficie de 1 ha. Los datos originales se sometieron a las pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov y de homogeneidad de varianza mediante pruebas de Bartlett (SAS Institute, 2000). Para conocer la influencia de la varianza genética y de los factores ambientales y su interacción se realizó un análisis de varianza de clasificación doble y se tomaron como factores los genotipos y los ambientes. Con los residuales de la IGA se realizaron los análisis estadísticos multivariados de la IGA y de estabilidad fenotípica. La prueba de F de Gollob (1968) se realizó para determinar la significancia de cada componente de interacción. Los análisis se realizaron con el programa en SAS desarrollado por Vargas y Crossa (2000).

variance was performed, and the genotypes and environments were taken as factors. With the IGA residuals, the multi-variate statistical analyses of IGA and of phenotypical stability were conducted. The F test of Gollob (1968) was performed to determine the significance of each component of the interaction. The analyses were performed with the SAS software developed by Vargas and Crossa (2000).

Additive main effects and multiplicative interaction model (AMMI)

The AMMI model combines the analyses of variance for the additive main effects and decomposition into singular values and vectors (DVS), or analysis of components of interaction (ACI) for the multiplicative parameters. In this context, IGA is considered a bifactorial design of genotypes and environments (Gauch, 2006). The AMMI model used for the analysis of the data was the following:

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

where Y_{ij} is the yield of the i^{th} genotype in the j^{th} environment; g_i is the mean deviation of the i^{th} genotype; e_j is the mean deviation

Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI)

El modelo AMMI combina los análisis de varianza para los efectos principales aditivos y la descomposición en valores y vectores singulares (DVS) o análisis de componentes de interacción (ACI), para los parámetros multiplicativos. En este contexto se considera la IGA un diseño bifactorial de genotipos y ambientes (Gauch, 2006). El modelo AMMI usado para el análisis de los datos fue el siguiente:

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

donde Y_{ij} es el rendimiento del $i^{\text{ésimo}}$ genotipo en el $j^{\text{ésimo}}$ ambiente; g_i es la desviación media del $i^{\text{ésimo}}$ genotipo; e_j es la desviación media del $j^{\text{ésimo}}$ ambiente; λ es la raíz cuadrada del valor propio del eje k del análisis de componentes principales (ACP); a_{ik} y γ_{jk} son los puntajes (scores) de los componentes principales para el eje k del ACP para el $i^{\text{ésimo}}$ genotipo en el $j^{\text{ésimo}}$ ambiente, respectivamente y ε_{ij} es el residual (Asfaw *et al.*, 2009).

A partir de este modelo se construyó el biplot AMMI2 en el que se representa, en el eje de las abscisas, los efectos multiplicativos del primer componente de interacción (CI1) y en el eje de las ordenadas, la descomposición de valores y vectores singulares de los genotipos y ambientes de la CI2.

Modelo de regresión de sitios (SREG)

Este modelo es similar al anterior, sólo que los efectos principales de los genotipos, que en el modelo AMMI se estiman como efectos aditivos, en el SREG se envían al residual para modelarlos de forma multivariada con el ACP, junto con la interacción (Yan *et al.*, 2000).

$$Y_{ij} = \mu + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k a_{ik} \gamma_{jk} + \varepsilon_{ij}.$$

A partir de la descomposición de los valores singulares se obtuvo el biplot SREG en el que se graficaron los rendimientos promedio de genotipos y ambientes (Yan y Tinker, 2006).

Valor de estabilidad de AMMI

El valor de estabilidad de AMMI (ASV) (Purchase *et al.*, 2000) es la distancia desde un punto de la coordenada al origen en una gráfica bidimensional de CI1 vs. CI2 y se calculó como sigue:

of the j^{th} environment; λ is the square root of the eigen value of the k axis of the principal components analysis (PCA); a_{ik} and γ_{jk} are the scores of the principal components for the K axis of the PCA for the i^{th} genotype in the j^{th} environment, respectively, and ε_{ij} is the residual (Asfaw *et al.*, 2009).

Using this model, the AMMI2 biplot was constructed, in which, in the abscissa axis, the multiplicative effects of the first component of interaction (CI1) is represented and in the ordinate axis, the decomposition of singular values and vectors of the genotypes and CI2 environments.

Site regression model (SREG)

This model is similar to the previous one, except that in the SREG model the main effects of the genotypes, which are estimated as additive effects in the AMMI model, are sent to the residual to model them in a multivariate manner with the ACP, together with the interaction (Yan *et al.*, 2000).

$$Y_{ij} = \mu + e_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k a_{ik} \gamma_{jk} + \varepsilon_{ij}.$$

From the decomposition of the singular values, we obtained the SREG biplot, in which average yields of genotypes and environments were graphed (Yan and Tinker, 2006).

AMMI stability value

The AMMI stability value (ASV) (Purchase *et al.*, 2000) is the distance from a point on the coordinate to the origin in a bidimensional graph of CI1 vs CI2 and is calculated as follows:

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{CI1_{SC}}{CI2_{SC}} (CI1_{SCORE}) \right]^2 + (CI2_{SCORE})^2}$$

where $CI1_{SC}/CI2_{SC}$ is the relative weight of CI1. The high, positive or negative, ASV values represent the genotypes adapted to a specific environment. The ASV values closest to the origin indicate more stable genotypes across environments (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

Genotype selection index

The genotype selection index is a parameter that incorporates average yield and the AMMI stability value (ASV) into a single criterion by means of the sum of its ranking values:

$$ASV = \sqrt{\left[\frac{CI1_{SC}}{CI2_{SC}} (CI1_{SCORE}) \right]^2 + (CI2_{SCORE})^2}$$

donde $CI1_{SC}/CI2_{SC}$ es el peso relativo de la CI1. Los valores de ASV altos, positivos o negativos, representan a los genotipos adaptados a un ambiente específico. Los valores de ASV más cercanos al origen señalan a genotipos más estables a través de ambientes (Lozano-Ramírez *et al.*, 2015).

Índice de selección de genotipos

El índice de selección de genotipos (GSI) (Farshadfar, 2008) es un parámetro que incorpora el rendimiento promedio y el valor de estabilidad de AMMI (ASV) en un solo criterio mediante la suma de sus valores de ordenamiento o ranking:

$$GSI = RASV + RY$$

donde RASV es la posición (Rank) del valor de estabilidad de AMMI, y RY es la posición del rendimiento promedio a través de ambientes. Los genotipos con el valor de GSI más bajo serán los más deseables, con mayor rendimiento y estabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

En el Cuadro 2 se presentan los valores promedio de rendimiento de grano de los genotipos evaluados en cada localidad, los cuales variaron desde 1.4 Mg ha⁻¹ en Charapan hasta 3.4 Mg ha⁻¹ en Erongarícuaro. Entre variedades, el rendimiento fue de 1.9 a 6.9 Mg ha⁻¹. El testigo comercial Ocelote [243] obtuvo el mayor rendimiento en los ambientes de AP de Erongarícuaro, con un promedio de 6.7 Mg ha⁻¹, mientras que SHUI-2 [6] fue el más productivo en el ambiente de BP de Pichátaro con un promedio de 4.2 Mg ha⁻¹. Otras cuatro variedades nativas obtuvieron altos rendimientos (4 Mg ha⁻¹) en los ambientes de BP de Erongarícuaro: H-7545 [117], Cruz gorda [140], Cimmyt-1 [185] y el Criollo de la región [242]. Los rendimientos observados entre localidades, ciclos biológicos y dosis de fertilización fueron similares a los obtenidos por Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid (2014) y Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid (2018) en un estudio con maíz nativo eficiente a P.

En las localidades de Pichátaro, Nahuátzen y Charapan, con agricultura de humedad residual,

$$GSI = RASV + RY$$

where RASV is the rank of the AMMI stability value, and RY is the rank of the average yield across environments. The genotypes with the lowest GSI values are the most desirable, with higher yield and stability.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of variance

Table 2 shows the average values for grain yield of the genotypes evaluated at each site. These values vary from 1.4 Mg ha⁻¹ in Charapan to 3.4 Mg ha⁻¹ in Erongarícuaro. Among the varieties, yield was 1.9 a 6.9 Mg ha⁻¹. The commercial control Ocelote [243] produced the highest yield in the AP environments of Erongarícuaro, with an average of 6.7 Mg ha⁻¹, while SHUI-2 [6] was the most productive in the BP environment of Pichátaro, with an average of 4.2 Mg ha⁻¹. Another four native varieties obtained high yields (4 Mg ha⁻¹) in the BP environments of Erongarícuaro: H-7545 [117], Cruz gorda [140], Cimmyt-1 [185] and the regional creole race [242]. The yields observed among sites, biological cycles and dosages of fertilizer were similar to those obtained by Bayuelo-Jiménez and Ochoa-Cadavid (2014) and Bayuelo-Jiménez and Ochoa-Cadavid (2018) in a P-efficient native maize.

In the localities of Pichátaro, Nahuátzen and Charapan, with residual moisture agriculture, there was a dominance of late genotypes with average yields of 1.9 a 3.1 Mg ha⁻¹, while in Charahuén and Erongarícuaro, with rainfed agriculture, early genotypes dominated with yields of 2.7 to 3.6 Mg ha⁻¹. According to Orozco-Ramírez *et al.* (2017), agricultural landscapes and distribution of maize in the region correspond to soil type and moisture regime. In Acrisols and Lithosols, with rainfed agriculture landscapes, short-cycle maize is planted. In the localities of this study, Andosols predominate (96 %), although their preponderance in Erongarícuaro and Charahuén is lower (69 %) (INEGI, 2009). The deficiency of P in the soil was a limiting factor for yield at both levels of fertilization (Table 1). The Andosols of this region are fertile, the result of its recent volcanic origin (González-Esquivel *et al.*, 2015), but they have a natural condition of high phosphate fixation and low fertilizer recovery

Cuadro 2. Promedio de rendimiento de grano (Mg ha⁻¹) de 27 genotipos de maíz de la Meseta P'urhépecha, en 10 ambientes.
Table 2. Average grain yield (Mg ha⁻¹) of 27 maize genotypes of the P'urhépecha Plateau, in 10 environments.

ID	Genotipo	M†	GM‡	Charahuén CHA	CHB	Charapan CPA	CPB	Erongaricuaru ERA	ERB	Pichátaro PIA	PIB	Nahuátzen NAA	NAB	DHS§
17	ZPT-2	P	C	2.9	1.9	0.6	0.6	3.7 [§]	3.7	1.3	1.7	1.5	1.4	0.6
99	TZU-7	P	C	3.9	3.3	0.6	0.5	3.8	3.3	2.5	2.0	1.9	1.8	1.3
140	Cruz Gorda	P	CM	2.7	2.5	0.8	1.1	3.4	4.6	1.2	2.4	2.1	1.5	0.7
189	El Tigre	P	CM	2.1	2.5	1.5	1.3	4.0	3.8	2.4	2.6	2.8	1.7	1.0
199	CHEDE	P	CM	2.1	3.4	1.4	0.9	3.8	3.8	1.2	2.0	2.4	2.6	1.1
135	HV-313 x DE	P	HxC	3.2	2.7	1.3	1.1	2.1	2.6	2.8	2.4	1.4	2.2	0.9
185	CIMMYT-1	P	HxC	2.3	2.4	1.2	1.1	4.0	4.1	1.4	1.6	2.0	1.9	0.8
193	NACI-1	P	HxC	3.0	1.6	1.7	1.9	3.5	3.2	2.0	1.6	2.0	1.8	0.8
234	Macho-I-04	P	S	2.4	2.4	1.4	1.5	3.2	3.9	1.8	2.7	2.2	2.6	1.2
236	Macho-II-03	P	S	2.8	3.4	1.5	1.7	4.1	3.1	2.5	2.2	3.1	3.0	1.0
62	PICH-1	I	C	2.1	2.3	1.5	1.8	2.4	1.6	2.6	2.9	2.7	1.6	0.9
206	Tepetate	I	CM	1.7	2.1	0.8	0.8	1.5	2.0	2.1	2.4	2.3	3.2	1.0
214	Mojonera	I	CM	2.9	2.6	1.4	1.3	2.8	3.2	3.0	2.6	2.6	2.0	1.1
181	Macho-III-04	I	S	2.4	2.8	1.0	1.3	2.7	2.3	1.2	1.7	2.6	2.1	0.9
230	Macho II-04	I	S	2.6	3.3	1.9	1.7	4.6	3.3	2.6	3.0	2.8	3.0	1.2
243	Ocelote	I	cv	4.2	3.8	0.5	0.6	6.7	6.1	1.7	2.1	2.4	2.2	1.3
6	SHUI-2	T	C	2.6	3.5	1.3	1.8	2.7	2.7	3.9	4.2	2.7	2.1	1.0
63	CB-2	T	C	2.3	2.1	1.6	1.8	2.8	3.7	3.1	3.2	2.5	1.9	0.9
75	ZR-6	T	C	2.5	2.1	1.6	2.0	1.5	1.7	3.0	2.5	2.5	1.9	0.7
109	Paso del muerto 1	T	CM	3.7	3.2	1.9	1.8	4.3	3.4	3.2	2.8	2.7	3.4	1.1
113	Paso del muerto 2	T	CM	3.8	2.7	1.9	1.6	2.2	3.1	3.1	2.8	3.3	3.5	1.0
115	Santa Clara	T	CM	4.0	3.0	1.3	2.0	3.3	3.8	2.6	2.4	3.2	2.6	1.1
124	Corupo	T	CM	4.1	3.2	1.9	2.2	2.9	2.7	3.7	2.7	2.7	2.7	1.3
242	Criollo región	T	CM	4.1	2.4	1.6	1.9	4.3	4.0	2.8	3.1	2.7	3.3	1.0
117	H-7545	T	HxC	3.9	3.6	1.5	2.0	4.4	4.7	2.8	3.6	2.9	2.6	1.4
127	DP x Tromba	T	HxC	2.7	2.8	1.6	1.4	3.3	3.9	2.6	2.4	3.0	3.0	0.9
241	Macho-IV-05	T	S	2.9	4.0	1.8	2.0	2.9	2.6	3.0	2.6	2.7	3.1	1.0
	Media Precoces			2.7	2.6	1.2	1.2	3.6	3.6	1.9	2.1	2.1	2.1	0.7
	Media Intermedios			2.7	2.8	1.2	1.3	3.5	3.1	2.2	2.4	2.6	2.4	0.7
	Media Tardíos			3.3	3.0	1.6	1.9	3.1	3.3	3.1	2.9	2.8	2.7	0.6
	DHS Madurez			0.4	0.3	0.2	0.2	0.6	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3	
	Media Ambiente			3.0	2.8	1.4	1.5	3.4	3.4	2.5	2.5	2.5	2.4	
	DHS Ambiente			1.4	1.2	0.8	0.7	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	0.9	

† Madurez: Precoz (P), Intermedio (I), Tardío (T). ‡ Grupo de mejoramiento: Criollo (C), Criollo mejorado (CM), Híbrido x Criollo (HxC), Sintético (S) y Cultivar mejorado (cv). § Valores en subrayado corresponden al ambiente de mayor rendimiento de grano para cada genotipo. CHA: Charahuén en AP; CHB: Charahuén en BP; CPA: Charapan en AP; CPB: Charapan en BP; ERA: Erongaricuaru en AP; ERB: Erongaricuaru en BP; PIA: Pichátaro en AP; PIB: Pichátaro en BP; NAA: Nahuátzen en AP; NAB: Nahuátzen en BP. † DHS: Diferencia Honesta Significativa a p≤0.05. ‡ Maturity: Early (P), Intermediate (I), Late (T). † Improvement group: Creole (C), Improved creole (CM), Hybrid x Creole (HxC), Synthetic (S) and improved cultivar (cv). § Underlined values correspond to the environment where each genotype produced the highest grain yield. CHA: Charahuén in AP; CHB: Charahuén in BP; CPA: Charapan in AP; CPB: Charapan in BP; ERA: Erongaricuaru in AP; ERB: Erongaricuaru in BP; PIA: Pichátaro in AP; PIB: Pichátaro in BP; NAA: Nahuátzen in AP; NAB: Nahuátzen in BP. † DHS: Honest significant difference at p≤0.05.

hubo una dominancia de genotipos de ciclo tardío con rendimiento promedio de 1.9 a 3.1 Mg ha⁻¹, mientras que en Charahuén y Erongarícuaro, con agricultura de temporal, dominaron genotipos precoces con rendimiento de 2.7 a 3.6 Mg ha⁻¹. Según Orozco-Ramírez *et al.* (2017), los paisajes agrícolas y la distribución de maíces en la región, corresponden al tipo de suelo o régimen de humedad. En los paisajes agrícolas de humedad residual y suelos de Ando se siembran temprano maíces de ciclo largo. En Acrisoles y Litosoles, con paisajes de agricultura de temporal, se siembra el maíz de ciclo corto. En las localidades de este estudio, predominan los Andosoles (96 %), aunque su preponderancia en Erongarícuaro y Charahuén es menor (69 %) (INEGI, 2009). La deficiencia de P en el suelo fue un factor limitante para el rendimiento en ambos niveles de fertilización (Cuadro 1). Los Andosoles de esta región son fértiles, resultado de su reciente origen volcánico (González-Esquivel *et al.*, 2015) pero presentan naturalmente una condición de alta fijación de fosfatos y baja recuperación del fertilizante (Van de Wiel *et al.*, 2017). Con una dosis alta de fertilización, la concentración de P disponible en el suelo fue baja (5.5 a 10.3 mg P kg⁻¹) mientras que, con una dosis reducida, la disponibilidad de P varió de 1.6 a 4.1 mg P kg⁻¹ y este nivel es inferior al valor crítico para el crecimiento de maíz (15 a 20 mg P kg⁻¹) (Setiyono *et al.*, 2010).

En condiciones de deficiencia de P como la que prevalece en los suelos de Ando, la mayor absorción de P (EAP) y una mejor eficiencia en su utilización fisiológica (EUtP) es favorable para incrementar la producción de grano y la EUP (Wang *et al.*, 2010). Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid (2018) señalaron que la mayor EUP de los genotipos estables de ciclo corto cultivados en Erongarícuaro y Charahuén se relacionó con una mayor EUtP, expresada en una mejor distribución de la materia seca hacia la semilla (IC = 0.3 a 0.4 kg semilla kg peso seco total⁻¹) y una mayor eficiencia para utilizar el P adquirido para la producción de semilla (ICP = 0.44 a 0.48 kg P semilla kg⁻¹ P). Los genotipos de mayor EUP y mayor estabilidad en ambientes de reducida disponibilidad de P; por ejemplo, Pichátaro, fueron más eficientes en la producción de grano por unidad de P absorbido (EAP). Esta respuesta se relaciona con un mayor crecimiento de raíces axilares (nodales) y pelos radicales que favorecen la absorción de P (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2014).

(Van de Wiel *et al.*, 2017). With a high dosage of fertilizer, the concentration of available P in the soil was low (5.5 a 10.3 mg P kg⁻¹), while, with a low dosage, P availability varied from 1.6 to 4.12 mg P kg⁻¹; this level is lower than the critical value for maize growth (15 to 20 mg P kg⁻¹) (Setiyono *et al.*, 2010).

When P is deficient, like in Ando soils, greater P absorption (EAP) and better physiological use efficiency (EUtP) favors increases in grain production and EUP Wang *et al.*, 2010). Bayuelo-Jiménez and Ochoa-Cadavid (2018) point out that EUP of stable short-cycle genotypes cultivated in Erongarícuaro and Charahuén was related with a higher EUtP, expressed in a better distribution of dry matter toward the seed (IC = 0.3 to 0.4 kg seed kg total dry weight⁻¹) and greater efficiency in using the acquired P for seed production (ICP = 0.44 to 0.48 kg seed kg⁻¹ P). The high EUP genotypes that are more stable in environments where available P is reduced, Pichátaro, for example, were more efficient in grain production per unit of absorbed P (EAP). This response is related to better growth of axillary roots (nodal) and root hairs that favor P absorption (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2014).

The analysis of variance of the combined AMMI model for grain yield showed that mean squares of environments, genotypes and IGA were significant ($p \leq 0.001$) (Table 3).

Forty-six percent of the sum of squares could be attributed to environmental effects, while genotypic effects and IGA represented 15 and 39 %, respectively. The significant interaction indicates that the genotypes performed differently in the tested environments. Similar results were found for populations of Chalqueño race maize (Arellano *et al.*, 2014) and for the Jala race in Nayarit (Montes-Hernández *et al.*, 2014).

AMMI model

Table 3 presents the Gollob test used to obtain the statistical weight of the multiplicative component of the AMMI model for the varieties evaluated in the different environments. This analysis showed that the three first components of interaction (CI) are significant ($p \leq 0.001$) and that together they explain 78.6 % (CI1 58.4 %, CI2 10.7 % and CI3 9.5 %) of the total variation due to the interaction. The results

El análisis de varianza del modelo AMMI combinado para rendimiento de grano mostró que los cuadrados medios de ambientes, genotipos y la IGA fueron significativos ($p \leq 0.001$) (Cuadro 3).

El 46 % de la suma de cuadrados pudo atribuirse a efectos ambientales, mientras que los efectos genotípicos y la IGA representaron 15 y 39 %, respectivamente. La interacción significativa indica que los genotipos tuvieron un comportamiento diferencial en los ambientes probados. Resultados similares se consignaron para poblaciones de maíz raza Chalqueño (Arellano *et al.*, 2014) y raza Jala en Nayarit (Montes-Hernández *et al.*, 2014).

Modelo AMMI

En el Cuadro 3 se presenta la prueba de Gollob utilizada para obtener el peso estadístico de los componentes multiplicativos del modelo AMMI para las variedades evaluadas en los diferentes ambientes. Este análisis mostró que los tres primeros componentes de interacción (CI) son significativos ($p \leq 0.001$) y que en conjunto explican 78.6 % (CI1 58.4 %, CI2 10.7 % y CI3 9.5 %) de la variación total debida a la interacción. Los resultados se muestran en un gráfico

are shown in a biplot graph in two dimensions (Figure 1), which correspond to the first two components of interaction.

Figure 1 shows that the varieties Paso del Muerto 1 [109], Santa Clara [115], DP × Tromba [127], NACl [193], Macho II-04 [230], Macho-I-04 [234], Macho-II-034 [236] and the local creole [242] were the closest to the origin, indicating their greater stability. The varieties H-7545 [117], Cruz Gorda [140] and Cimmyt-1 [185] had an acceptable average productive performance in terms of yield, but this changes considerably from one environment to another. In the graph of this evaluation it can also be observed that the varieties ZR6 [75], TZU-7 [99], Corupo [124], CCHEDÉ [199], Tepetate [206] and Ocelote [243] expressed adaptation to a specific environment in particular.

According to Oliviera *et al.* (2010), genotypes with CI1 values close to zero express better average adaptation across environments, while higher CI1 values indicate specific adaptations to a particular environment. The improved variety Ocelote [243], for example, obtained the highest value of CI1 (1.0), which indicates better adaptation in the AP environment of Erongarícuaro, while the genotype

Cuadro 3. Análisis de varianza del modelo AMMI y Prueba de Gollob para rendimiento de grano ($Mg\ ha^{-1}$) de los genotipos de maíz de la Meseta P'urhépecha en 10 ambientes.

Table 3. Analysis of variance of the AMMI model and Gollob test for grain yield ($Mg\ ha^{-1}$) of the maize genotypes from the P'urhépecha Plateau in 10 environment.

Fuente de variación	GL	SC	CM	SC explicado (%)
Tratamientos	269	968.56 [†]	3.60 [†]	
Rep (Ambientes)	30	16.26	0.54	
Ambientes	9	446.36 [†]	49.60 [†]	46.1 [‡]
Genotipos	26	144.86 [†]	5.57 [†]	14.9
Ambientes×Genotipos	234	377.34 [†]	1.61 [†]	38.9
CI 1	34	220.34 [†]	6.48 [†]	58.4 [§]
CI 2	32	40.43 [†]	1.26 [†]	10.7
CI 3	30	35.71 [†]	1.19 [†]	9.5
Residual	100	29.18	0.29	7.7
Error	780	141.17	0.18	
Total, corregido	1079	1126		
	CV =	16.87 %	R ² =	0.87

[†]F-test, $p \leq 0.01$; GL: grados de libertad; SC: suma de cuadrados; CM: cuadrados medios; CV: coeficiente de variación. [‡]Porcentaje explicado con relación a la SC de tratamientos.

[§]Porcentaje explicado con relación a la SC de la IGA. [♦]F-test, $p \leq 0.01$; GL: degrees of freedom; SC: sum of squares; CM: mean squares; CV: coefficient of variation. [‡]Percent explained relative to SC treatments. [§]Percent explained relative to the SC of IGA.

biplot en dos dimensiones (Figura 1) que corresponden a los dos primeros componentes de interacción.

La Figura 1 muestra que las variedades Paso del Muerto 1 [109], Santa Clara [115], DP × Tromba [127], NACL [193], Macho II-04 [230], Macho-I-04 [234], Macho-II-034 [236] y el criollo local [242] fueron las más cercanas al origen, lo que indica su mayor estabilidad; las variedades H-7545 [117], Cruz Gorda [140] y Cimmyt-1 [185] tuvieron un comportamiento productivo promedio aceptable de rendimiento, pero este cambia considerablemente de un ambiente a otro. En la gráfica de esta evaluación también se observa que las variedades ZR6 [75], TZU-7 [99], Corupo [124], CCHEDÉ [199], Tepetate [206] y Ocelote [243] expresaron una adaptación específica a un ambiente en particular.

De acuerdo con Oliviera *et al.* (2010), los genotipos con valores de CI1 cercanos a cero expresan una mayor adaptación promedio a través de ambientes, mientras que el aumento de los valores de CI1 señala adaptaciones específicas a un ambiente. La variedad mejorada Ocelote [243], por ejemplo, obtuvo el valor más alto de CI1 (1.0), lo que indica una mejor adaptación en el ambiente de AP de Erongarícuaro, mientras que el genotipo ZR6 [75] mostró el menor valor de CI1 (-0.52) y la mejor adaptación en el ambiente de AP de Pichátaro.

Con relación a los ambientes, Charahuén (CHB), Charapan (CPA y CPB), Pichátaro (PIB) y Nahuátzen (NAA y NAB) son localidades que presentaron una reducida longitud de su vector, lo que significa que el ambiente no permitió esclarecer diferencias en el rendimiento de los genotipos, en contraste con los ambientes de Charahuén (CHA) y Erongarícuaro (ERA y ERB), que fueron los que contribuyeron más a la interacción y por ello discriminaron mejor a los genotipos (Figura 1).

Análisis del modelo SREG

El requerimiento de una “*correlación perfecta*” ($r=0.95$) entre los valores del CI1 y los efectos principales del genotipo (Cossa *et al.*, 2002), que comúnmente ocurre cuando la suma de cuadrados (SC) del genotipo es mayor que el 40 % de la SC de GGE (Yan and Rajcan, 2002), no se cumplió en este estudio. En una correlación alta, los genotipos y ambientes se observarían en el cuadrante superior derecho e inferior izquierdo. La correlación entre los valores del

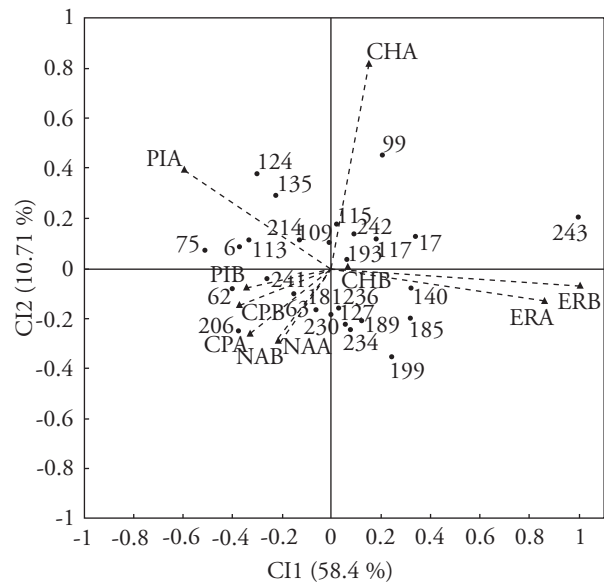


Figura 1. Gráfico biplot de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción representada mediante el primer y segundo componentes del modelo AMMI para rendimiento (Mg ha⁻¹) de 27 genotipos de maíz evaluados en 10 ambientes.

Figure 1. Biplot graph of the contribution of genotypes and environments to the interaction represented by the first and second components of the AMMI model for yield (Mg ha⁻¹) of 27 maize genotypes evaluated in 10 environments.

ZR6 [75] had a lower CI1 value (-0.52) and the best adaptation in the AP environment of Pichátaro.

The environments Charahuén (CHB), Charapan (CPA and CPB), Pichátaro (PIB) and Nahuátzen (NAA and NAB) are localities that presented a shorter vector, which means that the environment did not permit clear differences in yield of the genotypes. In contrast, the environments Charahuén (CHA) and Erongarícuaro (ERA and ERB) were those that contributed more to the interaction and, thus, better discriminated the genotypes (Figure 1).

SREG model analysis

The requirement of a “*perfect correlation*” ($r=0.95$) between the CI1 values and the principal effects of the genotype (Cossa *et al.*, 2002), which commonly occurs when the sum of the squares (SC) of the genotype is greater than 40% of the SC of GGE (Yan and Rajcan, 2002), was not met in our study. In a

componente de interacción (CI1) y los efectos principales del genotipo para el rendimiento ($r=0.48$) es menor a la correlación señalada en el modelo SREG; en consecuencia, este criterio limita el uso del biplot GGE del modelo SREG (Gauch, 2006). El modelo AMMI, por tanto, supera la desventaja del modelo SREG tal como lo señalan Asfaw *et al.* (2009).

Los dos primeros componentes de SREG explicaron en conjunto 71.4 % de la variación observada de la cual 44.8 % correspondió al componente 1 y 26.6 % al componente 2. La posición relativa de los 27 genotipos en el CI1 *vs.* CI2 se representan en Figura 2, la cual clasificó a los genotipos en dos grupos de producción: con alto y con bajo rendimiento de grano, y dos clases de adaptabilidad: estables e inestables. Los genotipos con un CI1 mayor de cero, como Paso del muerto [109], H-7545 [117] y Ocelote [243], presentaron rendimientos superiores al promedio y mostraron adaptación a un ambiente particular. Los genotipos con un CI1 negativo, como ZR6 [75], Macho-III-05 [181], NaCI-1 [193] y Tepetate [206], exhibieron rendimientos reducidos y una baja adaptabilidad. Anley *et al.* (2013) en *Zea mays* L. y Tolessa y Gela (2014) registraron resultados similares en *Phaseolus vulgaris* L.

Yan *et al.* (2000) señalaron que un genotipo ideal es aquel que presenta una alta estabilidad a través de ambientes, un CI1 positivo y un valor absoluto del CI2 cercano a cero. De acuerdo con esta interpretación, los genotipos con alto rendimiento y estabilidad a través de ambientes son DP \times Tromba [127], Macho-II-03 [236] y Santa Clara [115], con valores absolutos de CI1 de 0.036, 0.082 y 0.087, y CI2 de 0.069, 0.14 y 0.18, respectivamente (Figura 2). Estos genotipos son aptos para incorporarse en esquemas de mejoramiento para suelos ácidos con reducida disponibilidad de fósforo.

La magnitud relativa de la interacción de genotipos y localidades se presenta en la gráfica GGE biplot de los dos primeros componentes (Figura 2). La distancia al origen es un indicativo de la magnitud de la interacción de los genotipos a través de ambientes; entre más cercanos sean los valores de los ejes de interacción del análisis de CI1 de los genotipos al centro del biplot, mayor será su estabilidad o adaptación y, a medida que la longitud de los vectores se incremente, la inestabilidad se acentuará (Oliviera *et al.*, 2010).

El GGE biplot de CI1 *vs.* CI2 identificó grupos extremos de genotipos y mega-ambientes (polígono

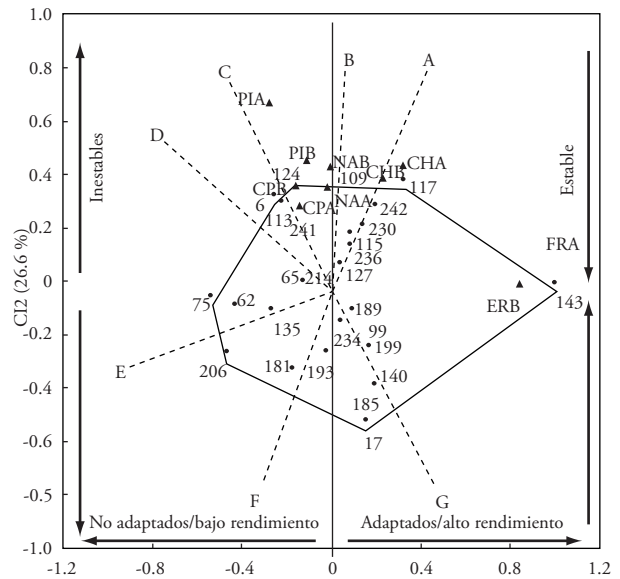


Figura 2. Gráfico biplot del modelo SREG que muestra la posición relativa de los genotipos evaluados en 10 ambientes de la Meseta P'urhépecha.

Figure 2. Biplot graph of the SREG model, which shows the relative position of the genotypes evaluated in 10 environments of the P'urhépecha Plateau.

high correlation, the genotypes and environments would be observed in the upper right and lower left quadrants. The correlation between the values of the component of interaction (CI1) and the principal effects of the genotype for yield ($r=0.48$) is lower than the correlation indicated in the SREG model. Consequently, this criterion limits the use of the GGE biplot of the SREG model (Gauch, 2006). The AMMI model, therefore, overcomes the disadvantage of the SREG model, as indicated by Asfaw *et al.* (2009).

The first two components of SREG together explain 71.4 % of the observed variation, of which 44.8 % corresponded to component 1 and 26.6 % to component 2. The relative position of the 27 genotypes in CI1 *vs.* CI2 is represented in Figure 2, which classified the genotypes into two production groups (high and low grain yield) and two classes of adaptability (stable and unstable). The genotypes with a CI1 above zero, such as Paso del muerto [109], H-7545 [117] and Ocelote [243], had higher than average yields and exhibited adaptation to a particular environment. The genotypes with a

delimitado por vectores, Figura 2); por ejemplo, Erongarícuaro (ERA) es una localidad favorable para evaluar genotipos con alto rendimiento en condiciones de mayor fertilidad (AP) como Ocelote [243].

El ambiente de BP de Charahuén (CHB) es una localidad idónea para seleccionar genotipos con un aceptable de rendimiento como Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho-II-04 [230], Macho II-03 [236] y Criollo de la región [242]. El GGE biplot de patrones descriptivos generales de genotipos y localidades ofrece la posibilidad de agrupar localidades en macroambientes y mostrar el patrón de comportamiento de los mejores cultivares para cada ambiente, tal como lo reportaron Tolessa y Gela (2014) y Lozano-Ramírez *et al.* (2015).

Como puede apreciarse en los dos tipos de GGE biplot, los resultados obtenidos en la descripción de la IGA y la estabilidad genotípica son similares, aunque con algunas diferencias en los porcentajes de la extracción de la varianza (SREG > AMMI). Gauch *et al.* (2008) señalaron que el biplot AMMI es útil para visualizar el patrón de comportamiento de los datos en estudios multi-ambientales y los efectos principales del genotipo, el ambiente y la IGA. El biplot GGE, por el contrario, es más eficaz para determinar la intensidad y la naturaleza de la IGA, así como la identificación de genotipos en ambientes específicos.

Análisis de estabilidad AMMI

El valor de estabilidad de AMMI (ASV) propuesto por Purchase *et al.* (2000) es un parámetro que permite cuantificar y ordenar los genotipos en términos de estabilidad del rendimiento. Los genotipos con valores de ASV altos, negativos o positivos, están más adaptados a ambientes específicos, mientras que aquellos con ASV bajos indican mayor estabilidad a través de ambientes. De acuerdo con este parámetro, los genotipos Paso del muerto-1 [109], Santa Clara [115], DP × Tromba [127] y Macho-II 03 [236] fueron los más estables en todos los ambientes, mientras que el cultivar Ocelote [243] fue el más inestable y sensible a un cambio ambiental y a la disponibilidad de P en el suelo (Cuadro 4).

Índice de selección de genotipos

La estabilidad *per se* no debería ser el único parámetro para seleccionar genotipos dado que los

negative CI1, such as ZR6 [75], Macho-III-05 [181], NaCI-1 [193] and Tepetate [206], had low yields and low adaptability. Anley *et al.* (2013) reported similar results in *Zea mays* L. and Tolessa and Gela (2014) in *Phaseolus vulgaris* L.

Yan *et al.* (2000) pointed out that an ideal genotype is that which is highly stable across environments, a positive CI1 and an absolute value of CI2 close to zero. According to this interpretation, high-yielding genotypes stable across environments are DP × Tromba [127], Macho-II-03 [236] and Santa Clara [115] with absolute CI1 values of 0.036, 0.082 and 0.087, and CI2 of 0.069, 0.14 and 0.18, respectively (Figure 2). These genotypes are suitable for incorporation in improvement schemes for acid soils that are poor in available phosphorus.

The relative magnitude of the interaction genotypes and localities is presented in the GGE biplot graph of the first two components (Figure 2). The distance to the origin is an indication of the magnitude of the interaction of the genotypes over environments, the closer the values to the interaction axes of the CI1 analysis of the genotypes at the center of the biplot, the greater their stability or adaptation, and in the measure that the length of the vectors increases, instability is more accentuated (Oliviera *et al.*, 2010).

The GGE biplot of CI1 vs CI2 identified extreme groups of genotypes and mega-environments (polygon delimited by vectors, Figure 2). For example, Erongarícuaro (ERA) is a favorable locality for evaluating high-yielding genotypes in conditions of better fertility (AP), such as Ocelote [243].

The BP environment of Charahuén (CHB) is an ideal locality for selecting genotypes with acceptable yield, such as Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho-II-04 [230], Macho II-03 [236] and regional Creole [242]. The GGE biplot of general descriptive patterns of genotypes and localities offers the possibility of grouping localities in macro-environments and showing the behavior pattern of the best cultivars for each environment, as reported by Tolessa and Gela (2014) and Lozano-Ramírez *et al.* (2015).

As we can see in the two types of GGE biplots, the results obtained in the description of IGA and genotypic stability are similar, although there are some differences in percentages of the extraction of the variance (SREG > AMMI). Gauch *et al.* (2008)

Cuadro 4. Rendimiento de grano, primer y segundo componente de interacción e índices de estabilidad de genotipos seleccionados de maíz nativo de la Meseta P'urhépecha.**Table 4. Grain yield, first and second component of interaction, and stability indexes of selected native maize genotypes from the P'urhépecha Plateau.**

ID	Variedad	RG Mg ha ⁻¹	Componentes		Índices de estabilidad	
			EC11	EC12	ASV [†]	GSI [‡]
109	Paso del muerto 1	3.06	0.13	0.38	0.11	3
115	Santa Clara	2.81	0.09	0.18	0.21	10
117	H-7545	3.20	0.32	0.38	1.01	14
124	Corupo	2.88	-0.16	0.40	1.66	24
127	DP × Tromba	2.67	0.04	0.07	0.19	14
189	El Tigre	2.49	0.09	-0.10	0.71	24
230	Macho II-04	2.89	0.14	0.21	0.39	12
236	Macho-II-03	2.75	0.08	0.14	0.24	14
242	Criollo región	3.00	0.19	0.29	0.52	13
243	Ocelote	3.06	1.00	0.00	5.45	30

[†]ASV=valor de estabilidad de AMMI (siglas en inglés). [‡]GSI=Índice de selección de genotipos (siglas en inglés) ♦ [†]ASV = valor de estabilidad de AMMI (siglas en inglés). [‡]GSI = Índice de selección de genotipos (siglas en inglés) ♦ [†]ASV = AMMI stability values. [‡]GSI = Genotype selection index.

genotipos más estables, no necesariamente son los más productivos (Farshadfar, 2008). El índice de selección de genotipos (GSI) es un parámetro que incorpora la suma del promedio del rendimiento a través de ambientes y el valor de estabilidad de AMMI para seleccionar genotipos estables y con mayor rendimiento (Farshadfar *et al.*, 2011). Así, entre menor sea el valor del GSI, mayor será la estabilidad y el rendimiento de la variedad. Con base en este índice, los genotipos más deseables para la selección de estabilidad y con rendimiento alto fueron Paso el muerto-1 [109], Santa Clara [115] y Macho II-04 [230]. Resultados similares se obtuvieron con el biplot de AMMI (Figura 2) y el índice de estabilidad de AMMI (Cuadro 4). Por lo expuesto, la predicción del rendimiento de los genotipos con base en los parámetros de estabilidad fue confiable para las evaluaciones realizadas. Ambos índices de estabilidad (ASV y GSI) se usaron con éxito por Bose *et al.* (2014) en *Oryza sativa*; Farshadfar *et al.* (2011) en *Triticum aestivum* L. y Baraki *et al.* (2014) en *Sesamum indicum* L.

Índice de estabilidad de ambientes

El rendimiento de grano en los 10 ambientes fue diferente, lo que indica su efecto desfavorable en algunos genotipos (Cuadro 5). Según el índice de estabilidad de AMMI, los ambientes con valores más altos (inestables) fueron ERA (5.45) y ERB (4.7),

pointed out that the AMMI biplot is useful for visualizing the behavior pattern of the data in multi-environmental studies and the principal effects of the genotype, the environment and the IGA. In contrast, the GGE biplot is more effective for determining the intensity and nature of the IGA, as well as for identifying genotypes in specific environments.

Analysis of AMMI stability

The AMMI stability value (ASV) proposed by Purchase *et al.* (2000) is a parameter that allows quantification and ranking of the genotypes in terms of yield stability. The genotypes with high, negative or positive, ASV values are more adapted to specific environments, while those with low ASV indicate greater stability across environments. According to this parameter, the genotypes Paso del muerto-1 [109], Santa Clara [115], DP × Tromba [127] and Macho-II 03 [236] were the most stable in all the environments, while the cultivar Ocelote [243] was the most unstable and sensitive to environmental change and to the availability of P in the soil (Table 4).

Genotype selection index

Stability *per se* should not be the only parameter used to select genotypes since the most stable

Cuadro 5. Rendimiento de grano (RG), primer y segundo componente de interacción e índice de estabilidad de AMMI para 10 ambientes de la Meseta P’urhépecha.

Table 5. Grain yield (RG), first and second component of interaction and AMMI stability index for ten environments of the Plateau P’urhépecha.

Ambiente	P	Código	RG Mg ha ⁻¹	Componentes		Índice [†] ASV
				ECI1	EC12	
Charahuén	BP	CHB	2.80	0.07	0.01	0.36
Charahuén	AP	CHA	2.96	0.15	0.82	1.16
Nahuátzen	AP	NAA	2.50	-0.21	-0.28	1.20
Nahuátzen	BP	NAB	2.40	-0.22	-0.28	1.23
Charapan	AP	CPA	1.38	-0.33	-0.26	1.82
Pichátaro	BP	PIB	2.52	-0.34	-0.07	1.88
Charapan	BP	CPB	1.47	-0.37	-0.15	2.03
Pichátaro	AP	PIA	2.45	-0.60	0.40	3.27
Erongarícuaro	BP	ERB	3.36	0.86	-0.12	4.69
Erongarícuaro	AP	ERA	3.38	1.00	-0.07	5.45

[†]ASV=valor de estabilidad de AMMI (por sus siglas en inglés). [‡]ASV = AMMI stability value.

mientras que el ambiente de CHB (0.36) fue el más estable y con rendimientos superior al promedio (2.5 Mg ha⁻¹). Este último ambiente podría ser propicio para futuros programas de mejoramiento de maíz en suelos con baja disponibilidad de fósforo.

CONCLUSIONES

El germoplasma de la Meseta P’urhépecha tiene variación genotípica y estabilidad fenotípica para rendimiento de grano en suelos ácidos. Con base en el valor de estabilidad AMMI (ASV) e índice de selección de genotipos (GSI), los genotipos más estables y con mayor rendimiento de grano en los ambientes evaluados fueron DP × Tromba [127], Macho-I-04 [236] y Santa Clara [115]. Los ambientes con valores más altos (inestables) del índice AMMI fueron ERA y ERB, mientras que el ambiente de CHB fue el más estable y con rendimientos superior al promedio. La localidad de Charahuén podría discriminar genotipos con mayor rendimiento de grano en suelos con deficiencia de fósforo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, FOMIX-Gobierno del estado de Michoacán MICH-2012 No. 197142/2013-2016 y la Coordinación de Investigación Científica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. CIC 6.11/2015-2017.

genotypes are not necessarily the most productive (Farshadfar, 2008). The genotype selection index (GSI) is a parameter that incorporates the sum of the average yield over environments and the AMMI stability value for selection of higher-yielding stable genotypes (Farshadfar *et al.*, 2011). In this way, the lower the GSI value, the higher the stability and yield of the variety. Based on this index, the most desirable genotypes for selection of stability and high yield were Paso del muerto-1 [109], Santa Clara [115] and Macho II-04 [230]. Similar results were obtained with the AMMI biplot (Figure 2) and the AMMI stability index (Table 4). Thus, the prediction of yield of the genotypes based on the stability parameters was reliable for the evaluations conducted. Both stability indexes (ASV and GSI) were used successfully by Bose *et al.* (2014) in *Oryza sativa*, Farshadfar *et al.* (2011) in *Triticum aestivum* L., and Baraki *et al.* (2014) in *Sesamum indicum* L.

Environment stability index

Grain yield in the ten environments was different, indicating its unfavorable effect on some of the genotypes (Table 5). According to the AMMI stability index, environments with higher values (unstable) were ERA (5.45) and ERB (4.7), while the CHB environment (0.36) was more stable and had yields above the average (2.5 Mg ha⁻¹). The

LITERATURA CITADA

- Alcalá J., M., C. A. Ortiz S., y M. C. Gutiérrez C. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 19: 217-239.
- Anley, W., H. Zeleke, and Y. Dessalegn. 2013. Genotype \times environment interaction of maize (*Zea mays* L.) across North Western Ethiopia. *J. Plant Breed. Crop Sci.* 5: 171-181.
- Arellano V., J. L., I. Rojas M., y G. F. Gutiérrez H. 2014. Variedades de maíz azul Chalqueño seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad del rendimiento. *Rev. Mex. Ciencias Agríc.* 5: 1469-1480.
- Asfaw, A., F. Alemayehu, F. Gurum, and M. Atnaf. 2009. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. *Scientif. Res. Essay* 4: 1322-1330.
- Astier, M., J. N. Maass, J. D. Etchevers-Barra, J. J. Peña, and F. de León González. 2006. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. *Soil Tillage Res.* 88: 153-159.
- Baraki, F., Y. Tsehay, and F. Abay. 2014. AMMI analysis of genotype \times environment interaction and stability of sesame genotypes in Northern Ethiopia. *Asian J. Plant Sci.* 13: 178-183.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., y I. Ochoa-Cadavid. 2014. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. *Field Crops Res.* 156: 123-134.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., y I. Ochoa-Cadavid. 2018. Interacción genotipo \times ambiente para la eficiencia en el uso de fósforo en maíz nativo de la Meseta P'urhépecha. *Rev. Fitotec. Mex.* 41: 39-47.
- Bose, L. K., N. N. Jambhulkar., K. Pande, and O. N. Singh. 2014. Use of AMMI and other stability statistics in the simultaneous selection of rice genotypes for yield and stability under direct-seeded conditions. *Chilean J. Agric. Res.* 74: 3-9.
- Crossa, J., P. L. Cornelius, and W. Yan. 2002. Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype \times environment interaction. *Crop Sci.* 42: 619-633.
- Eakin, H., H. Perales., K. Appendini, and S. Sweeney. 2014. Selling maize in Mexico: the persistence of peasant farming in an era of global markets. *Develop. Change* 45: 133-155.
- Eberhart, S. A., and W. A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.
- Farshadfar, E. 2008. Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pak. J. Biol. Sci.* 11: 1791-1796.
- Farshadfar, E., N. Mahmodi, and A. Yaghotipoor. 2011. AMMI stability value and simultaneous estimation of yield and yield stability in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Austral. J. Crop Sci.* 5: 1837-1844.
- Gauch, H. G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46: 1488-1500.
- Gauch, H. G., H. P. Piepho, and P. Annicchiarico. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations. *Crop Sci.* 48: 866-889.
- Gollob, H. F. 1968. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika* 33:73-115.
- latter environment could be useful for future maize breeding programs in soils with low availability of phosphorus.

CONCLUSIONS

Germplasm of the P'urhépecha Plateau has genotypic variation and phenotypic stability for grain yield in acid soils. Based on the AMMI stability value (ASV) and genotype selection index (GSI), the most stable genotypes with the highest grain yield in the environments evaluated were DP \times Tromba [127], Macho-I-04 [236] and Santa Clara [115]. The environments with the highest values (unstable) of the AMMI index were ERA and ERB, while the CHB environment was the most stable and had the highest grain yield in soils deficient in phosphorus.

—End of the English version—



- González-Esquivel, C. E., M. E. Gavito, M. Astier, M. Cadena-Salgado, E. del-Val, L. Villamil-Echeverri, Y. Merlín-Uribe, and P. Balvanera. 2015. Ecosystem service trade-offs, perceived drivers, and sustainability in contrasting agroecosystems in central Mexico. *Ecol. Soc.* 20: 38.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Información a nivel nacional, estatal y municipal. Pronuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Claves geoestadísticas 16021, 16032, 16056 y 16090. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=16> (Consulta: junio 2018).
- Lozano-Ramírez, A., A. Santacruz-Varela, F. San-Vicente-García, J. Crossa, J. Burqueño, y J. D. Molina-Galán. 2015. Modelación de la interacción genotipo \times ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 337-347.
- Martínez-Sánchez, J., N. Espinoza P., y Y. Villegas A. 2016. Interacción genotipo-ambiente en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Rev. Mex. Agrosist.* 3: 38-48.
- Mijangos-Cortés, J. O., T. Corona-Torres, D. Espinosa-Victoria, A. Muñoz-Orozco, J. Romero-Peñaloza, and A. Santacruz-Varela. 2007. Differentiation among maize (*Zea mays* L.) landraces from the Tarasca Mountain Chain, Michoacan, Mexico and the Chalqueño Complex. *Genetic Resour. Crop Evol.* 54:309-325.
- Montes-Hernández, L. A., J. A. Hernández-Guzmán, H. López-Sánchez, A. Santacruz-Varela, H. Vaquera-Huerta, y R. Valdivia-Bernal. 2014. Expresión fenotípica *in situ* de carac-

- terísticas agronómicas y morfológicas en poblaciones de maíz raza Jala. *Rev. Fitotec. Mex.* 37: 363-372.
- Oliveira, R. L., R. Garcia Von Pinho, M. Balestre, and D. V. Ferreira. 2010. Evaluation of maize hybrids and environmental stratification by the methods AMMI and GGE biplot. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 10: 247-253.
- Orozco-Ramírez, Q., J. Odental, y M. Astier. 2017. Diversidad de maíces en Pátzcuaro, México, y su relación con factores ambientales y sociales. *Agrociencia* 51:867-884.
- Purchase, J. L., H. Hatting, and C. S. Van Deventer. 2000. Genotype × environment interaction on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South Afr. J. Plant Soil* 17: 101-107.
- SAS Institute. 2000. SAS user' guide: statistics. SAS Inst. Cary, NC.
- Setiyono T. D., D. T. Walkers, K. G. Cassman, C. Witt, and A. Dobermann. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Res.* 118: 158-168.
- Speelman, E. N., M. Astier, S. López-Ridaura, P. A. Leffelaar, and M. K. van Ittersum. 2006. Trade-off analysis for sustainability evaluation: a case study of the Purhepecha region, Mexico. *Outlook Agric.* 35: 57-64.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2017. Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. Ciudad de México. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do (Consulta: junio 2018).
- SMN (Sistema Meteorológico Nacional). 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, D.F. <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mich> (Consulta: junio 2018).
- Shukla, G. K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity* 29: 237-245.
- Tolessa, T. T., and T. S. Gela. 2014. Sites regression GGE biplot analysis of haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes in three contrasting environments. *World J. Agric. Res.* 2: 228-236.
- Van de Wiel, C. C. M., C. G. van der Linden, and O. E. Scholten. 2017. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. *Euphytica* 207: 1-22.
- Vargas H., M., and J. Crossa. 2000. The AMMI analysis and graphing the biplot. Biometrics and Statistics Unit, CIMMYT. México, D. F. 39 p.
- Vázquez C., M. G., D. Santiago R., Y. Salinas M., I. Rojas M., J. L. Arellano V., G. A. Velázquez C., y A. Espinosa C. 2012. Interacción genotipo-ambiente del rendimiento y calidad de grano y tortilla de híbridos de maíz en Valles Altos de Tlaxcala, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 229-237.
- Wang X., J. Shen, and H. Liao. 2010. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Sci.* 179: 302-306.
- Yan, W., L. A. Hunt, Q. Sheng, and Z. Szlavncics. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40: 597-605.
- Yan W., and I. Rajcan. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Sci.* 42: 11-20.
- Yan, W., and N. A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Can. J. Plant Sci.* 86: 623-645.

