



Adaptability and stability of maize ear length jala race in five environments

Adaptabilidad y estabilidad de longitud de mazorca de maíz raza jala en cinco ambientes

López-Guzmán, J. A.¹, Aguilar-Castillo, J. A.^{2*}, García-Zavala, J. J.³, Lobato-Ortiz, R.³

¹INIFAP-CIRNO, Campo Experimental Valle de Culiacán, Carr. Culiacán–El Dorado Km 16.5 C.P. 80000, Culiacán, Sinaloa.

²Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura, Carr. Tepic-Compostela Km. 9, 63780, Xalisco, Nayarit.

³Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carr. México-Texcoco, 56230, Montecillo, Texcoco, México.

Cite this paper/Como citar este artículo: López-Guzmán, J. A., Aguilar-Castillo, J. A., García-Zavala, J. J., Lobato-Ortiz, R. (2018). Adaptability and stability of maize ear length jala race in five environments. *Revista Bio Ciencias* 5(3), e472. doi: <http://dx.doi.org/10.15741/revbio.05.03.02>



ABSTRACT

In Mexico, and in the world, maize (*Zea mays* L.) is grown under different environmental conditions that influence different expressions of genotypes, a phenomenon known as genotype-by-environment interaction (GEI). In breeding programs, it is important to define what outstanding genotypes are in terms of performance, adaptability and stability in multi-environments, to be able to recommend their commercial use. The objective of this work was to study the adaptability and stability of ear length in 14 representative populations of maize Jala race by means of AMMI and SREG methods. Populations were planted in 2012 in five locations, four of them in the State of Nayarit and the other one in the Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, State of Mexico. Localities of Nayarit were established at the beginning of the rainy season and the one in CP was planted on May tenth, where irrigation was applied until the establishment of the rainy season. A randomized complete block design was used with three replications. The studied trait was the ear length. AMMI and SREG statistical analyzes, as well as biplot gra-

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: March 23rd 2018.

Accepted/Aceptado: July 25th 2018.

Available on line/Publicado: December 18th 2018.

RESUMEN

En México, y en el mundo, el maíz (*Zea mays* L.) se cultiva en diferentes condiciones ambientales que provocan expresiones diferentes de comportamiento de los genotipos, fenómeno denominado interacción genotipo por ambiente. En los programas de mejoramiento genético es importante definir cuáles son los genotipos sobresalientes en cuanto a su rendimiento, adaptabilidad y estabilidad en multi-ambientes, para recomendar su uso de manera comercial. El objetivo del presente trabajo fue estudiar la adaptabilidad y estabilidad de la longitud de mazorca de 14 poblaciones representativas de maíz de la raza Jala por los métodos AMMI y SREG. Las poblaciones se sembraron en el año 2012 en cinco localidades, cuatro de ellas en el Estado de Nayarit y la otra en el Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Las localidades de Nayarit se establecieron al inicio de la temporada de lluvias y en el CP se sembró el 10 de mayo, donde se aplicaron riegos de auxilio hasta el establecimiento de la temporada de lluvias. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La variable estudiada fue la longitud de mazorca. Los análisis estadísticos AMMI y SREG, así como las gráficas biplot se realizaron con el programa SAS. Las poblaciones P1, P3 y P4 fueron las que presentaron una baja interacción población x localidad, en tanto que P5, UAN-2009C, y los

*Corresponding Author: Juan Apolinar Aguilar Castillo, Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Agricultura, Carr. Tepic-Compostela Km. 9, 63780, Xalisco, Nayarit. Teléfono (044) 311 910 0387 E-mail: aguilarcj@hotmail.com

phs, were carried out with SAS software. P1, P3 and P4 populations were those that presented a low population x locality interaction, while P5, UAN-2009C, and 13XT and 8XT varietal hybrids presented high values of interaction. The locality that best discriminated the environments was San José de Mojarras.

KEY WORDS

Maize Jala race, AMMI, SREG, ear length

Introduction

In Mexico and around the world, according to Nzuve *et al.* (2013) cited by Sánchez *et al.* (2016), maize (*Zea mays* L.) is cultivated in a wide range of environmental conditions associated with soil moisture state, solar radiation, temperature, soil types and production systems. These conditions cause different expressions of genotypes, a phenomenon known as genotype-by-environment interaction (GEI) (McDermott & Coe, 2012). Balzarini *et al.* (2005) mention that interaction drives to two situations; a) stability, referring to the ability of genotypes to express themselves consistently and it can be in both directions: high or low yield performance and b) specific adaptability, described as the outstanding expression of a genotype in a determined range of environments or localities.

In plant breeding programs, it is important to define which are the outstanding genotypes, in terms of performance, adaptability and stability, assessing these properties in multi-environments to be able to recommend their commercial use (Crossa *et al.*, 2006; Gordón-Mendoza *et al.*, 2006). Adaptation in a broad sense refers to the best performance related to a genotype in most of the test environments, while adaptation in a specific sense shows the genotype with the most suitable performance in a test environment (Fuentes & Queme, 2005).

A challenge for plant breeding programs is to obtain genotypes with higher yields, but performance potential is frequently masked up by GEI (Lozano *et al.*, 2015). Gordón *et al.* (2006) mention that GEI occurs when genotypes respond differently to environmental variants. Crossa *et al.* (2006) mention that studying GEI in plant breeding is very important, since it represents the result of the response of each genotype to environmental variations. The plant breeder has to face these problems to obtain a genotype closer to the ideal one.

híbridos varietales 13XT y 8XT presentaron valores altos de interacción. La localidad que mejor discriminó a los ambientes fue San José de Mojarras.

PALABRAS CLAVE

Raza Jala, AMMI, SREG, longitud de mazorca

Introducción

En México, y alrededor del mundo, de acuerdo con Nzuve *et al.* (2013) citado por Sánchez *et al.* (2016) el maíz (*Zea mays* L.) se cultiva en una amplia variedad de condiciones ambientales asociadas con el estado hídrico del suelo, radiación solar, temperatura, tipos de suelo y sistemas de producción. Estas condiciones provocan expresiones diferentes de comportamiento de los genotipos, fenómeno denominado interacción genotipo por ambiente (GEI) (McDermott & Coe, 2012). Balzarini *et al.* (2005) mencionan que la interacción conduce a dos situaciones; a) la estabilidad, que se refiere a la habilidad de los genotipos para expresarse de manera consistente y puede ser en ambos sentidos; rendimiento alto o rendimiento bajo y b) la adaptación específica, descrita como la expresión sobresaliente de un genotipo en un determinado rango de ambientes o localidades.

En los programas de mejoramiento genético, es importante definir cuáles son los genotipos sobresalientes en cuanto a su rendimiento, adaptabilidad y estabilidad, evaluando estas propiedades en multi-ambientes para recomendar su uso de manera comercial (Crossa *et al.*, 2006; Gordón-Mendoza *et al.*, 2006). La adaptación en sentido amplio se refiere al mejor comportamiento relativo de un genotipo en la mayoría de los ambientes de prueba, mientras que la adaptación en sentido específico le muestra el genotipo con mejor comportamiento en un determinado ambiente de prueba (Fuentes & Queme, 2005).

Un reto en los programas de mejoramiento genético es obtener genotipos con rendimientos mayores, pero con frecuencia el potencial de rendimiento es enmascarado por GEI (Lozano *et al.*, 2015). Gordón *et al.* (2006) mencionan que la interacción GEI ocurre cuando los genotipos responden de manera diferente a las variantes del ambiente. Crossa *et al.* (2006) mencionan que el estudio de la interacción GEI en el mejoramiento genético vegetal es muy importante, pues ésta es el resultado de la respuesta de cada genotipo frente a las variaciones ambientales. El mejorador de plantas tiene que encarar estos problemas para así obtener un genotipo más cercano al ideal.

Tests of genotypes in multi-environments are important for plant breeding as indicated by Crossa *et al.* (2006), because genotypes are evaluated in different environmental conditions, their response is compared, their general stability and adaptability are assessed, GEI is studied, and the best genotypes in specific environments and across environments are selected for comparison in experimental trials or recommended for their commercial use.

There are various models to interpret the response of genotypes across environments and to study and interpret GEI in agricultural experiments, among them lineal, bilineal and lineal-bilineal models. Models of fix lineal-bilineal effects, as SREG (Crossa & Cornelius, 1997) and of Additive Main effect & Multiplicative Interaction (AMMI) (Gauch, 1988; Gauch & Zobel, 1997) are used to study patterns of genotypic response across environments.

AMMI model is defined as the Additive Main effect and Multiplicative Interaction model (Gauch, 2006; Glaz & Kang, 2008), it essentially consists in combining technics of analysis of variance and Principal Component Analysis (PCA) in a single model, here the analysis of variance allows to study the main effects of genotypes and environments, while GEI is addressed in a multivariate way by means of PCA, where a reparametrization of the regression model is performed to improve interpretation of the interaction (Zobel *et al.*, 1988).

Interpretation of results obtained from the AMMI analysis is based on a graphic representation called GGE biplot, making the identification and visual interpretation of genotypes and assessed environments easier, as well as the exploration of behavioral patterns attributed to GEI effects (Yant *et al.*, 2000; McDermott & Coe, 2012). GGE biplot graphs are made using the two first principal components (PC1 and PC2). Thus, the genotype that is in the vertex is the one that best responds in assessed environments, since the two first principal components explain the highest portion of the variation in the GEI (Yant *et al.*, 2001).

From the AMMI model, the effect of genotypes, combined with the effect of the interaction, ($G + G \times E$), can be estimated, so that a model, called site regression (SREG), is generated. This model is recommended when environmental effects are the main source of variation,

Las pruebas en multiambientes son importantes en el mejoramiento de plantas como lo indican Crossa *et al.* (2006), porque los genotipos que son evaluados en diferentes condiciones ambientales, su respuesta es comparada, su estabilidad y adaptabilidad general es evaluada, GEI es estudiada, y los mejores genotipos en ambientes específicos y a través de ambientes son seleccionados para la comparación en ensayos experimentales o para su recomendación de uso comercial.

Existen varios modelos para interpretar la respuesta de los genotipos a través de ambientes y para estudiar e interpretar GEI en experimentos agrícolas, entre ellos los modelos lineales, bilineales y lineal-bilineal. Los modelos de efectos fijos lineal-bilineal, como el SREG (Crossa & Cornelius, 1997) y el de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) (Gauch, 1988; Gauch & Zobel, 1997) se utilizan para el estudio de los patrones de respuesta genotípica a través de ambientes.

El modelo AMMI se define como el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (Gauch, 2006; Glaz & Kang, 2008), consiste esencialmente en combinar las técnicas del análisis de varianza y el análisis de componentes principales PCA en un solo modelo, aquí el análisis de varianza permite estudiar los efectos principales de genotipos y ambientes, en tanto que GEI se trata de forma multivariada mediante el PCA, donde se realiza una reparametrización del modelo de regresión para mejorar la interpretación de la interacción (Zobel *et al.*, 1988).

Para interpretar los resultados obtenidos del análisis AMMI, se apoya en la representación de los gráficos denominados GGE biplot, que facilitan la identificación e interpretación visual de los genotipos y los ambientes de evaluación, así como la exploración de patrones de comportamiento atribuidos a los efectos de interacción genotipo por ambiente (Yant *et al.*, 2000; McDermott & Coe, 2012). Los gráficos GGE biplot se confeccionan utilizando los dos primeros componentes principales PC1 y PC2. Así, el mejor genotipo que está en el vértice es el que mejor responde en los ambientes de evaluación, debido a que los dos primeros componentes principales explican la mayor parte de la variación en la GEI (Yant *et al.*, 2001).

Del modelo AMMI es posible estimar el efecto de genotipos combinado con el efecto de la interacción ($G + G \times A$), de tal forma que es posible generar el modelo llamado regresión en los sitios (SREG). Este modelo se recomienda cuando los

and it presents other extra advantages. Indeed, SREG model, which include G+GE in the bilinear term, provides a graphic analysis of easy interpretation of genotypes performance plus a GEI effect', called GGE biplot (Yan *et al.*, 2000). The graph allows visualizing genotypes and environments clusters (mega-environments or macro-environments) with similar response patterns, as well as identifying the most representative and discriminatory environments (Yan & Rajcan 2002).

GGE biplot is constructed from the first two principal components (PC) of the SREG model. The first component, when is found to be highly correlated to the main effect of the genotype, represents the proportion of the yield due only to genotype traits. The second component represents the portion of yield due to GEI. Genotypes close to each other in GGE biplot present similar response pattern across environments. Environments close to each other, given by the acute angle between their vectors, indicate a positive environmental association, that is, similar response patterns in the relative performance of a cluster of genotypes. An absence of association between environments is given by a right angle between vectors and a negative association by an obtuse angle (Yan and Rajcan 2002). Therefore, this study aimed to investigate the adaptability and stability of ear length of 14 populations of maize Jala race by AMMI and SRG methods.

Materials and Methods

Fourteen populations of maize, representative of the Jala race or its germplasm, were assessed. Five populations were sampled from farmers of the Jala region in Nayarit during 2012, which were referred as P1, P2, P3, P4 and P5; seven populations were composites of individual selection (Aguilar & Carballo, 2007) UAN-2008, UAN-2009A, UAN-2009B, UAN-2009C, UAN-2010, UAN-2011, and Montecillo-2007; and two populations were varietal hybrids 13 XT and 8 XT with 50% of Jala germplasm, which were used as checks.

Populations were planted in 2012 in five localities (Table 1), three of them (L1, L2 and L3) were established in plots property of cooperating farmers from the state of Nayarit. L4 locality was established in the facilities of Agriculture Academic Unit of the Autonomous University of Nayarit, in Xalisco, Nayarit, and L5 locality in the Postgraduate College, Montecillo Campus, Montecillo, Texcoco, State of Mexico.

efectos ambientales son la fuente de variación más importante, tiene otras ventajas adicionales. En efecto, el modelo SREG, que incluye G+GE en el término bilineal, proporciona un análisis gráfico de fácil interpretación del comportamiento de los genotipos más el efecto de la interacción genotipo-ambiente, denominado biplot GGE (Yan *et al.*, 2000). El gráfico permite visualizar el agrupamiento de genotipos y ambientes (megambientes o macroambientes) con patrones similares de respuesta, así como identificar los ambientes más representativos y los más discriminativos (Yan & Rajcan 2002).

El biplot GGE se construye a partir de los primeros dos componentes principales (PC) del modelo SREG. El primer componente, cuando se encuentra altamente correlacionado con el efecto principal del genotipo, representa la proporción del rendimiento que se debe solo a las características del genotipo. El segundo componente representa la parte del rendimiento debido a la interacción del genotipo-ambiente. Los genotipos cercanos entre sí en el biplot GGE presentan patrones similares de respuesta a través de los ambientes. Los ambientes cercanos entre sí, dado por el ángulo agudo entre sus vectores, indican asociación ambiental positiva, es decir, patrones similares de respuesta en el comportamiento relativo de un conjunto de genotipos. La ausencia de asociación entre ambientes es dada por el ángulo recto entre vectores y la asociación negativa por el ángulo obtuso (Yan *et al.*, 2000). Por lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo estudiar la adaptabilidad y estabilidad de la longitud de mazorca de 14 poblaciones de maíz de la raza Jala por los métodos AMMI y SREG.

Materiales y Métodos

Se evaluaron 14 poblaciones de maíz representativas de la raza Jala o con germoplasma de esta. Cinco poblaciones se colectaron de agricultores de la región de Jala, Nayarit, durante el año 2012, a las que se les denominó P1, P2, P3, P4 y P5; siete poblaciones fueron los compuestos de selección individual (Aguilar & Carballo, 2007) UAN-2008, UAN-2009A, UAN-2009B, UAN-2009C, UAN-2010, UAN-2011, y Montecillo-2007; y dos poblaciones fueron los híbridos varietales 13 XT y 8 XT con 50 % de germoplasma de Jala, los cuales se usaron como testigos.

Las poblaciones se sembraron en el año 2012 en cinco localidades (Cuadro 1), tres de las cuales (L1, L2, y L3) se establecieron en parcelas de agricultores cooperantes del Estado de Nayarit. La localidad L4 se estableció en las instalaciones de la Unidad Académica de Agricultura de la Universidad Autónoma de Nayarit, en Xalisco, Nayarit, y la

Table 1.
Edaphoclimatic characteristics and geographic location of selected sites for the evaluation of 14 populations of maize Jala race.

Tabla 1.
Características edafoclimáticas y ubicación geográfica de las localidades donde se evaluaron las 14 poblaciones de maíz de la raza Jala. 2012.

Location	Name	Soil texture	pH	AR (mm)	Altitude (m)	AAT (°C)	N L	WL
L1	San José de Mojarras	Clay	5.8	1113	912	24.3	21°25'	104°36'
L2	Ixtlán del Río	Loam	6.5	859.8	1038	23	21° 02'	104°33'
L3	Jala	Sand	5.6	837.4	1016	23.2	21°05'	104°31'
L4	Xalisco	Sandy Loam	4.7	1232.4	984	23	21°22'	104°24'
L5	Montecillo	Clay	8.4	655.6	2250	16.3	19°30'	98°52'

AR: Average Rainfall; AAT: Average Annual Temperature; pH: soil pH; NL: North Latitude; WL: West Longitude

The trials in L1, L2, L3 and L4 localities coincided with the beginning of the rainy season; in L5 locality maize was planted on May 10th, where irrigation was applied until the establishment of the rainy season. In each locality, assessment was performed in a randomized complete block design with three replications. In all cases, the experimental unit was two rows of 5 m long and 0.80 m between rows, and two seeds were sowed every 0.35 m. Fertilization and cultivation activities were performed according to traditional practices of each locality. The 100N-60P-30K formula was used to fertilize plants; an application of 50% of nitrogen and all phosphorus and potassium was performed at sowing and the rest of nitrogen was applied later during cultivation.

From each plot, five plants with complete competency (cc) were randomly selected, to which ear length trait was measured: ear were dried at room temperature and length was measured when they reached constant moisture (LMZ, in cm).

The analysis according to AMMI method is based on a lineal-bilineal statistical method (Crossa & Cornelius, 2000), in which the main effects of genotypes and environments, considered as lineal terms, are explained by means of a conventional analysis of variance; the bilineal component (not additive) is attributed to GEI and is analyzed by means of Principal Component Analysis (PCA). If the two first principal components explain an important portion of the variance of the GEI matrix (60%) (Gauch & Zobel, 1988), a graphic representation (biplot)

localidad (L5) en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

El establecimiento de los ensayos en las localidades L1, L2, L3 y L4 coincidió con el inicio de la temporada de lluvias; en la L5 se sembró el día 10 de mayo, donde se aplicaron riegos de auxilio hasta el establecimiento del periodo normal de lluvias. En cada localidad la evaluación se hizo en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. En todos los casos la unidad experimental fue de dos surcos de 5 m de longitud y 0.80 m entre surcos, y se depositaron dos semillas por golpe cada 0.35 m. La fertilización y labores de cultivo se realizaron de acuerdo con las prácticas tradicionales de cada localidad. Se utilizó la formula 100N-60P-30K, se aplicó el 50% del nitrógeno y todo el fosforo y potasio al momento de la siembra y el resto del nitrógeno se aplicó al momento del cultivo.

De cada parcela se seleccionaron al azar cinco plantas con competencia completa (cc), a las que se le midió el carácter de longitud de mazorca: las mazorcas se secaron a temperatura ambiente y cuando llegaron a humedad constante se midió la longitud (LMZ, cm).

El análisis con base en el modelo AMMI se basa en un modelo estadístico lineal-bilineal (Crossa & Cornelius, 2000), en el que los efectos principales de genotipos y de ambientes, considerados términos lineales, se explican mediante un análisis de varianza convencional; el componente bilineal (no aditivo) se atribuye a la interacción genotipo x ambiente, y se analiza mediante la técnica de componentes principales. Si

of the variability of the observations can be performed, where environments and genotypes are considered (Kempton, 1984; Crossa, 1990).

For the analysis, AMMI programming methods were used, as described by Vargas & Crossa (2000), using the following mathematic model:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + E_{ij}$$

Where: Y_{ij} = yield performance of the i^{th} genotype in the j^{th} environment; μ = general average; g_i = effect of the i^{th} genotype; e_j = effect of the j^{th} environment; λ_k = squared root of the characteristic vector of the k^{th} axe of the PCA; α_{ik} = qualification of the PCA for the k^{th} axe of the i^{th} genotype; γ_{jk} = qualification of the PCA for the k^{th} axe of the j^{th} environment; E_{ij} = value of error.

The site regression model (SREG) is based on a model similar to the AMMI model, but lineal terms of genotypes are not considered individually, adding themselves to the multiplicative term of GEI. SREG model is useful for environments clustering with no opposite interaction, that is, ordering without change of genotypes in environments that conform a cluster (Cornelius & Crossa, 1999; Yan *et al.*, 2000). Moreover, it allows the simultaneous representation of genotypes and environments variability, based on Principal Component Analysis (Yan *et al.*, 2000). The SREG site regression model is the following: $Y_{ij} - \bar{Y}_i = \lambda_1 \epsilon_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \epsilon_{i2} \eta_{j2} + e_{ij}$; where: Y_{ij} = average performance observed for genotype i in the environment j ; \bar{Y}_i = average of genotypes in the environment j ; λ_1 = intrinsic value of principal component 1 (PC1); λ_2 = intrinsic value of principal component 2 (PC2); ϵ_{i1} = score of the genotype i on PC1; ϵ_{i2} = score of genotype j on PC2; η_{j1} = score of the environment i on PC1; η_{j2} = score of environment j on PC2; e_{ij} = residual.

AMMI and SREG statistical analysis, as well as biplot graphs were performed with SAS® software (SAS Institute Inc., 2002), according to procedures established by Vargas & Crossa (2000).

Results and discussion

AMMI combined analysis of variance (Table 2) detected highly significant differences among localities and populations, while the interaction of both factors resulted not significant. A coefficient of

los dos primeros componentes principales explican una parte importante de la variabilidad de la matriz GEI (60 %) (Gauch & Zobel, 1988), es posible hacer una representación gráfica (biplot) de la variabilidad de las observaciones, donde se consideran ambientes y genotipos (Kempton, 1984; Crossa, 1990).

Para el análisis se emplearon los métodos de programación AMMI descritas por Vargas & Crossa (2000), utilizando el siguiente modelo matemático;

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + E_{ij}$$

Dónde: Y_{ij} = rendimiento del i -ésimo genotipo en el j -ésimo ambiente; μ = media general; g_i = efecto del i -ésimo genotipo; e_j = efecto del j -ésimo ambiente; λ_k = raíz cuadrada del vector característico del k -ésimo eje del PCA; α_{ik} = calificación del PCA para el k -ésimo eje del i -ésimo genotipo; γ_{jk} = calificación del PCA para el k -ésimo eje del j -ésimo ambiente; E_{ij} = valor del error.

El modelo de regresión de sitios (SREG) se basa en un modelo similar al AMMI, pero los términos lineales de genotipos no se consideran individualmente, adicionándose al término multiplicativo de la GEI. El SREG es útil para la agrupación de ambientes con interacción no opuesta, es decir, ordenamiento sin cambio de genotipos en ambientes que conforman un grupo (Cornelius & Crossa, 1999; Yan *et al.*, 2000). Además, permite la representación simultánea de la variabilidad de genotipos y ambientes, basada en el análisis de componentes principales (Yan *et al.*, 2000). El modelo de regresión en los sitios SREG es el siguiente: $Y_{ij} - \bar{Y}_i = \lambda_1 \epsilon_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \epsilon_{i2} \eta_{j2} + e_{ij}$; donde: Y_{ij} = es el rendimiento medio observado del genotipo i en el ambiente j ; \bar{Y}_i = es la media de los genotipos en el ambiente j ; λ_1 = valor propio del componente principal 1 (PC1); λ_2 = valor propio del componente principal 2 (PC2); ϵ_{i1} = score del genotipo i sobre PC1; ϵ_{i2} = score del genotipo j sobre el PC2; η_{j1} = score del ambiente i sobre PC1; η_{j2} = score del ambiente j sobre PC2; e_{ij} = residual.

Los análisis estadísticos AMMI y SREG, así como las gráficas biplot se realizaron con el programa SAS (SAS Institute, 2002) de acuerdo a los procedimientos establecidos por Vargas & Crossa (2000).

Resultados y discusión

El análisis de varianza combinado del AMMI (Cuadro 2) detectó diferencias altamente significativas entre localidades y entre poblaciones, mientras que la interacción de ambos factores resultó no significativa. Se obtuvo un coeficiente de variación

variation of 8.13 was obtained, and it is considered as an acceptable value regarding the condition of this experiment. Environmental conditions and their effects on populations were observed to be different in all the test environments. The absence of significance of GEI for ear length, which is a highly quantitative trait, and therefore very influenced by environmental conditions, indicates that statistically there was no differential response in ear length of genotypes among the different test environments (Canales *et al.*, 2016).

de 8.13, considerado como un valor aceptable en cuanto a la condición del experimento. Se puede observar que las condiciones ambientales y sus efectos sobre las poblaciones fueron diferentes en todos los ambientes de prueba. La ausencia de significancia de la GEI para longitud de mazorca, el cual es un carácter altamente cuantitativo, y por lo tanto muy influenciado por las condiciones ambientales, indica que estadísticamente no hubo una respuesta diferencial en la longitud de mazorca de los genotipos a través de los diferentes ambientes de prueba (Canales *et al.*, 2016).

Table 2.

AMMI analysis of variance for ear length of 14 populations of maize Jala race assessed in five localities during 2012.

Tabla 2.

Análisis de varianza AMMI para longitud de mazorca de 14 poblaciones de maíz raza Jala evaluadas en 5 localidades durante el ciclo 2012.

S.V.	df.	SS	MS
Locations (l)	4	298.81	74.70**
Populations (p)	13	221.34	17.02**
Interactions (pxl)	52	179.6	3.45
PC1	16	98.53	6.15
PC2	14	41.39	2.95
Error	138	342.75	2.48
Total Corrected	209	1056.3	
CV (%)	8.13		
Mean	19.36		

S.V.: source of variation; df: degrees of freedom; **: significant; SS: Sum of squares; MS: Mean Square; CV: Coefficient of Variation; PC1 and PC2: Principal Components 1 and 2.

Besides, in the quantity of total sum of squares, in the AMMI analysis, the effect of locations contributed to 28% while the effects of population and of locations x population interaction represented 21 and 17%, respectively. The above-mentioned indicated that the effects of locations contributed in a higher proportion to the variation in the expression of ear length, in comparison with factors of population and of population x location interaction. These results have been obtained in previous research, where environments and GEI factors were reported to be superior to the effects of genotypes (Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012).

Por otro lado, en la cantidad de suma de cuadrados total, en el análisis AMMI, el efecto de localidades contribuyó en un 28 %, mientras que los efectos de población e interacción localidades por población representaron 21 y 17 %, respectivamente. Lo anterior indica que los efectos de localidades contribuyeron en mayor proporción a la variación en la expresión de longitud de mazorca, en comparación con los factores de poblaciones y de la interacción población x localidad. Estos resultados se han obtenido en investigaciones previas, en donde reportan que el factor de ambientes y de interacción genotipo x ambiente son superiores a los efectos de genotipos (Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012).

Populations that presented a higher ear length were UAN-2011, P5 and UAN-2008 in all the test localities. Locations with the highest expression of ear length were L2 (Ixtlán del Río) and L4 (Xalisco). Populations that obtained the lowest absolute values of PC1, that is, which less interacted with the environment, were P1

Las poblaciones que presentaron una mayor longitud de mazorca fueron UAN-2011, P5 y UAN-2008 en todas las localidades de prueba. Las localidades con mejor expresión de la longitud de mazorca fueron L2 (Ixtlán del Río) y L4 (Xalisco). Las poblaciones que obtuvieron valores absolutos más bajos del PC1, es decir que

with 0.20 and P8 (UAN-2009A) with 0.35, all with values close to zero, which can be considered as the most stable across environments (Medina *et al.*, 2002; Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012). Locations with the best performance regarding absolute values of PC1 were L2 (Ixtlán del Rio) with -0.61 and L3 (Jala) with 0.72 (Table 3).

interaccionaron menos con el ambiente, fueron P1 con 0.20 y P8 (UAN-2009A) con 0.35 todas con valores cercanos a cero, las cuales pueden considerarse como las más estables a través de ambientes (Medina *et al.*, 2002; Alejos *et al.*, 2006; Palemón *et al.*, 2012). Las localidades con mejor comportamiento respecto a los

Table 3.

Means of ear length in the different populations and environments and PC values of the 14 assessed populations in five environments during 2012 period.

Tabla 3.

Longitud de mazorca en promedio de poblaciones y de ambientes y valores de CP de las 14 poblaciones evaluadas en 5 ambientes durante el periodo de 2012.

Populations	Environments					Means	PC1
	L1	L2	L3	L4	L5		
P1	18.5a	19.8ab	16.7a	18.6bd	17.1a	18.1ce	0.20
P2	17.9a	20.4ab	16.4a	18.7bd	15.8a	17.8de	-0.24
P3	20.7a	20.7ab	17.6a	20.8ad	18.5a	19.6ad	-0.10
P4	21.1a	20.6ab	17.1a	19.9ad	18.2a	19.4ad	-0.14
P5	21.1a	22.9a	18.7a	22.6a	17.7a	20.6a	-0.82
Montecillo 2007	21.5a	20.2ab	18.8a	19.6ad	16.7a	19.2ad	-0.26
UAN-2008	22.0a	21.1ab	17.3a	21.2ac	18.9a	20.1ab	-0.32
UAN-2009A	18.8a	22.3ab	19.1a	20.6ad	18.9a	19.9ac	0.35
UAN-2009B	20.0a	21.3ab	18.4a	21.6ab	17.8a	19.8ac	-0.30
UAN-2009C	21.4a	21.8ab	17.4a	21.3ac	17.6a	19.9ac	-0.70
UAN-2010	20.4a	21.4ab	16.9a	22.0ab	17.7a	19.7ad	-0.67
UAN-2011	21.9a	19.9ab	20.8a	21.8ab	19.8a	20.8a	0.43
13 xt	18.2a	19.2ab	17.6a	17.6cd	19.5a	18.4be	1.27
8 xt	16.0a	17.9b	15.9a	17.4d	18.6a	17.1e	1.32
Means	19.9a	20.7a	17.7b	20.2a	18.0b		
PC1	-0.88	-0.61	0.72	-0.98	1.75		

PC1; Principal Component 1. Means with the same letter in column were not statistically different (Tukey, $P \leq 0.05$).

Figure 1 presents the interpretation of the extent which populations interacted with the environment. P12 (UAN-2011), P5 and P7 (UAN-2008) populations presented ear lengths superior to the general mean, while P14 (8XT) and P2 populations presented ear lengths lower than the mean (Figure 1). Populations with low values of PC1 that interacted less with the environment were P3 and P4, while P5, P10 (UAN-2009C), P11 (UAN-2010), P13 (13XT) and P14 (8XT) populations presented absolute values superior to 0.60 on PC1 and therefore it was inferred that they contributed to a greater extent to the interaction (Cossa 1990; Medina *et al.*, 2002). L3 (Jala), L2 (Ixtlán del Rio) and L1 (San José de Mojarras) localities were identified as those with the best

valores absolutos del CP1 Fueron; L2 (Ixtlán del Rio) con -0.61 y L3 (Jala) con 0.72 (Cuadro 3).

En la Figura 1 se puede interpretar las poblaciones que interaccionan con el ambiente en mayor o menor magnitud. Las poblaciones P12 (UAN-2011), P5 y P7 (UAN-2008), presentaron longitud de mazorca superior a la media general, mientras que las poblaciones P14 (8XT) y P2 presentaron las longitudes menores a la media (Figura 1). Las poblaciones con valores bajos de CP1 que interaccionaron menos con el ambiente fueron P3 y P4, mientras que las poblaciones P5, P10 (UAN-2009C), P11 (UAN-2010), P13 (13XT) y P14 (8XT) presentaron valores absolutos superiores a 0.60 sobre el CP1 y por esto se infiere que contribuyeron en mayor grado

performance by their PC1 values, as they were closer to zero or for presenting lower variation between them.

In AMMI analysis, the first principal component explained 54% of the sum of squares and the second component explained 23% of the total sum of squares, therefore, both principal components described 77% of the effect of GEI. Yan *et al.* (2000) mention that environments whose

performance by their PC1 values, as they were closer to zero or for presenting lower variation between them. a la interacción (Crossa 1990; Medina *et al.*, 2002). Se logró identificar a las localidades L3 (Jala), L2 (Ixtlán del Río) y L1 (San José de Mojarra) como los de mejor comportamiento por sus valores de CP1, por estar más cercanos a cero o presentar menor variación entre estos.

En el análisis AMMI, el primer componente principal explico 54% de la suma de cuadrados y el segundo componente

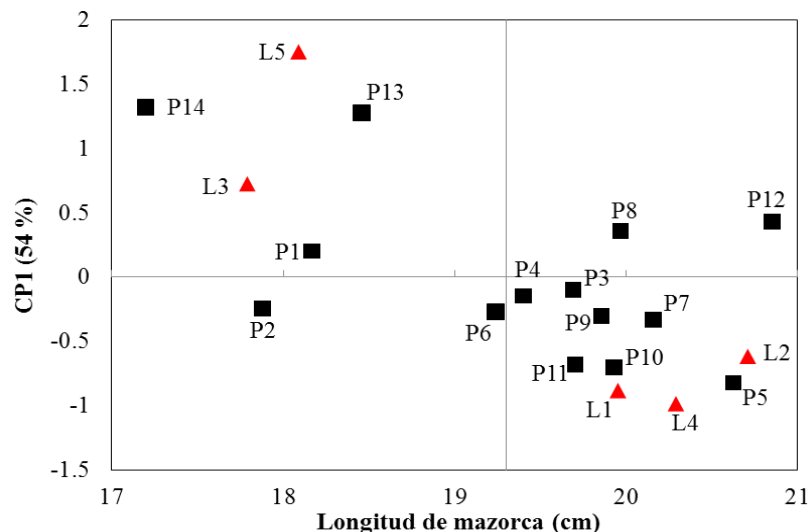


Figure 1. Graphic representation of PC1 according to the average ear length of 14 populations evaluated in five locations.

Figura 1. Representación gráfica del CP1 en función de la longitud de mazorca promedio de 14 poblaciones evaluadas en cinco localidades

angles were lower than 90° cluster similar genotypes. In these results two clusters of environments were observed; in the first environment were found L1 (San José de Mojarra), L2 (Ixtlán del Río) and L4 (Xalisco) localities, in the second environment were found L3 (Jala) and L5 (Montecillos) localities. Based on the major length of the vectors of each environment, localities that better distinguished populations were; L1 (San José de Mojarra), L2 (Ixtlán del Río) and L5 (Montecillo), according to criteria applied by Kempton (1984) and Yan *et al.* (2000). Such criteria indicate that the length of vectors gives indication on variance magnitude, that is why vectors of major length distinguished genotypes in a better way.

Three populations showed a trend close to zero, and, in a narrower sense, populations (P3, P4 and P1),

23% de la suma total de cuadrados, por lo que entre ambos componentes principales describieron el 77% del efecto de la interacción genotipo x ambiente. Yan *et al.* (2000) mencionan que ambientes cuyos ángulos sean menores a 90° clasifican de manera semejante a los genotipos. En estos resultados se puede observar que se formaron dos grupos de ambientes; en el primer ambiente se encuentran las localidades L1 (San José de Mojarra), L2 (Ixtlán del Río) y L4 (Xalisco), en el segundo ambiente se encuentran las localidades L3 (Jala) y L5 (Montecillos). Con base a la mayor longitud de los vectores de cada ambiente, las localidades que mejor discriminaron a las poblaciones fueron; L1 (San José de Mojarra), L2 (Ixtlán del Río), y L5 (Montecillo), de acuerdo con los criterios aplicados por Kempton (1984) y Yan *et al.* (2000). Tales criterios indican que la longitud de los vectores nos indica la magnitud de la varianza, es por eso que los vectores de mayor longitud discriminan de mejor manera a los genotipos.

were the most stable in the localities where they were assessed (Figure 2).

The interpretation of the SREG biplot model is similar to the one of the AMMI biplot, the two first components explained 66% of the variation for component 1 and 16% for component 2, which are represented in 'biplot' of

Tres poblaciones mostraron una tendencia cercana a cero, y, en un sentido más estricto, las poblaciones (P3, P4 y P1), fueron las más estables en las localidades donde fueron evaluadas (Figura 2).

La interpretación del modelo biplot SREG es similar a la del AMMI, los dos primeros componentes explican 66% de la

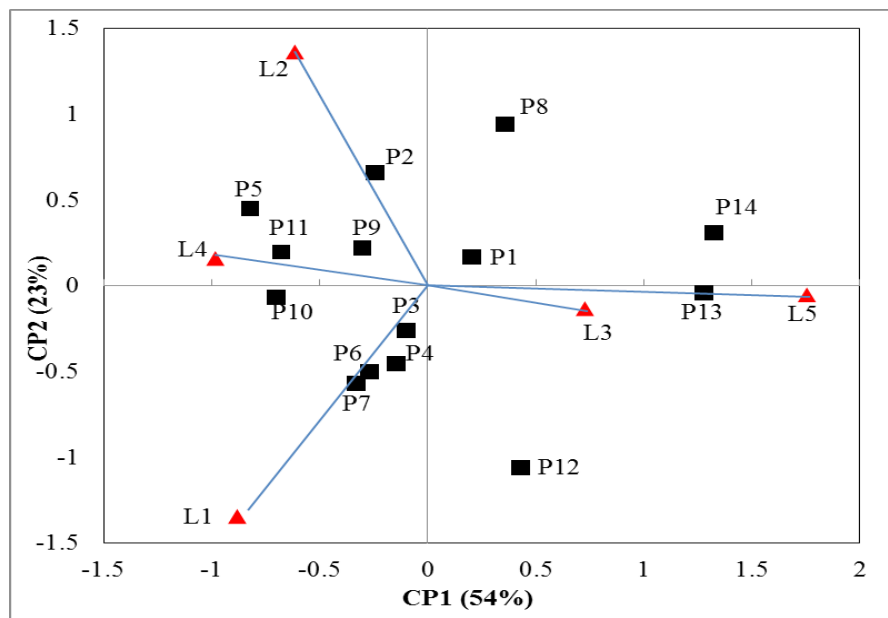


Figure 2. Biplot AMMI for 14 populations. The points (P) represent populations and vector (L) the localities.

Figura 2. Biplot AMMI para 14 poblaciones. Los puntos (P) representan a las poblaciones y los vectores las localidades.

Figure 3, exhibiting response patterns of 14 populations of maize Jala race assessed in five localities. Crossa (1990) mentions that genotypes and environments with high coordinates in component 1 direction, considered in absolute value, contributed to a greater extent to GEI, while genotypes and environments with values close to zero in component 1 direction have a few participation on this effect.

In GGE biplot, each population was represented by a point or a defined marker when the coefficients of each population were graphically represented in PC1 (X-axis) against the respective coefficients in PC2 (Y-axis). Environments were presented as vectors originating from the coordinate (0,0) of the biplot and extended until the corresponding marker. According to Yan *et al.* (2000), when the points are drawn in a graph, representing scoring of both principal axis, a polygon is

variación para el componente 1 y 16% para el componente 2, los cuales se representan en el "biplot" de la figura 3 que exhibe los patrones de respuesta de 14 poblaciones de maíz raza Jala evaluados en cinco localidades. Crossa (1990) menciona que los genotipos y ambientes con coordenadas grandes en la dirección del componente 1, consideradas en valor absoluto, contribuyen en mayor medida a la GEI, mientras que los genotipos y ambientes con valores cercanos a cero para la dirección del componente 1 tienen poca participación sobre este efecto.

En el biplot GGE cada población fue representada por un punto o marcador definido al graficar los coeficientes de cada población en la PC1 (eje x) contra los respectivos coeficientes en el PC2 (eje y). Los ambientes fueron presentados como vectores que se originan en la coordenada (0,0) del biplot y se extiende hasta el marcador correspondiente. De acuerdo con Yan *et al.* (2000), al graficar las puntuaciones de ambos

formed with cultivars that remain in the extern part of the figure (in this case, P12 (UAN-2011), P13 (13xt), P14 (8XT), P2 and P5 populations). These populations are those that bring the most to the interaction, that is, they are those of highest and lowest length. Perpendicular lines to each one of the polygon sides and that cross by the biplot origin divided polygon in five sectors. Localities remained clustered in only two of these sectors. The genotype corresponding to a vertex of the polygon included into a sector has the best performance in the environments that are inside of this sector (Ibañez *et al.*, 2006; Yan *et al.* 2000). P12 vertex population (UAN-2011) had the highest mean of ear length (20.8 cm) in L1 (San José de Mojarras), L3 (Jala) and L5 (Montecillo) localities that were inside of one of the sectors. P5 vertex population had the best performance (22.8 cm) in L2 (Xtlán del Río) and L4 (Xalisco) localities, included inside of the other sector (Figure 3). P2 and P14 (8XT) populations, corresponding to vertexes of the polygon that remained far away from the assessed localities, were those that presented the lowest means of ear length across all the localities (Figure 3). Populations, whose markers stayed located inside of the polygon, were those of lower response to environments of expression and those located closer to biplot origin were even more stable.

ejes principales, se forma un polígono con los cultivares que quedan en la parte externa de la figura (en este caso fueron las poblaciones P12 (UAN-2011), P13 (13xt), P14 (8xt), P2 y P5). Estas poblaciones son las que más aportan a la interacción, es decir son las de más alto y más baja longitud. Líneas perpendiculares a cada uno de los lados del polígono y que pasan por el origen del biplot dividieron al polígono en cinco sectores. Las localidades quedaron agrupadas en solo dos de estos sectores. El genotipo correspondiente a un vértice del polígono que se halla comprendido dentro de un sector tiene el mejor rendimiento en el o los ambientes que se encuentran dentro de ese mismo sector (Ibañez *et al.*, 2006; Yant *et al.* 2000). La población vértice P12 (UAN-2011) tuvo la más alta longitud de mazorca promedio (20.8 cm) en las localidades L1 (San José de Mojarras), L3 (Jala) y L5 (Montecillo) que cayeron dentro de uno de los sectores. La población vértice P5 fue el que tuvo el mejor potencial (22.8 cm) en las localidades L2 (Xtlán del Río) y L4 (Xalisco), incluidas dentro del otro sector (Cuadro 3). Las poblaciones P2 y P14 (8xt), correspondientes a vértices del polígono que quedaron alejados de las localidades de evaluación, fueron las que manifestaron las menores longitudes de mazorca promedio a través de todas las localidades (Figura 3). Las poblaciones, cuyos marcadores quedaron ubicados dentro del polígono, fueron los de menor respuesta a los ambientes de expresión y fueron más estables aun aquellos ubicados más próximos al origen del biplot.

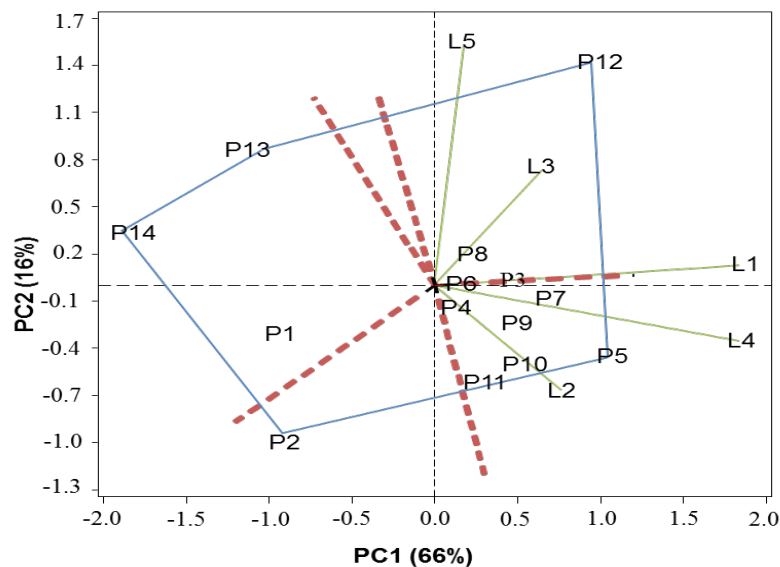


Figure 3. SREG biplot for 14 populations of maize Jala race. Points (P) represent populations and vectors (L) represent localities.

Figura 3. Biplot SREG for 14 maize populations. The points (P) represent the populations and vectors (L) the localities.

According to Yan & Rajcan (2002), ideal genotypes must have a high scoring for PC1 (yield ability) and a low scoring for PC2 (high stability). P7 (UAN-2008) population presented a high potential of yield performance (high PC1) and a predictable or stable performance (PC2 close to zero) according to Figure 3 and may be considered as the ideal population for its general adaptation in all the localities.

According to Yan *et al.* (2001), ideal cultivars must have a high scoring for PC1 (high mean for yield) and a scoring for PC2 close to zero (higher stability). Similarly, ideal test environments must have a high scoring for PC1 (more differentiation for cultivars) and scoring for PC2 close to zero (more representative for a mean of environments). In this case, the most representative locality is L1 (San José de Mojarras).

Conclusions

P1, P3 and P4 populations were those that presented a low population x locality interaction, while P5, UAN-209C, and the varietal hybrids 13XT and 8XT presented high values of interaction. The locality that best differentiated the environments was San José de Mojarras.

The GGE-SREG biplot model, P7 (UAN-2008) was identified as the population with the highest capacity of adaptation in the test localities.

In general, it was observed that the population that presented the lowest interaction was P3, and the one that most contributed to the interaction was P5. The highest variation was attributed to the effects of locality.

References

- Aguilar-Castillo J. A. & Carballo-Carballo A. (2007). Recuperación conservación y aprovechamiento de la raza Jala de maíz: una alternativa para las razas en peligro de extinción. Colegio de Postgraduados-Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos, RED MAIZ. pp. 3-27.
- Alejos, G.; Monasterio, P. and Rea, R. 2006. Análisis de la interacción genotipo-ambiente para el rendimiento de maíz en la región maicera del estado de Yuracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical*. 56(3): 369-384. http://www.sian.inia.gob.ve/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at5603/pdf/alejos_g.pdf
- Balzarini M., Bruno C. and Arroyo A. (2005). Análisis de ensayos agrícolas multi-ambientales. Ejemplos con Info. Gen. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Córdoba. Córdoba Argentina 141 p.
- Canales Islas E. I., Tadeo Robles, M., Mejía Contreras, J.A., García Zavala, J.J., Espinoza Calderón, A., Castillo González, F., Sierra Macías, M. and Gómez Montiel, N. (2016). Estabilidad del rendimiento de grano en híbridos trilineales androesteriles de maíz para valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 7(8): 815-1827pp. <http://www.redalyc.org/html/2631/263149505003/>

De acuerdo con Yan & Rajcan (2002), los genotipos ideales deben tener alta capacidad de rendimiento (PC1) y una pequeña puntuación para (PC2) (alta estabilidad). La población P7 (UAN-2008) presentó un alto potencial de rendimiento (alta PC1) y comportamiento predecible o estable (PC2 cercana a cero) Figura 3 puede ser considerada la población ideal por su adaptación general a todas las localidades.

Según Yan *et al.* (2001), los cultivares ideales deben tener una gran puntuación de PC1 (alta media de rendimiento) y una puntuación para PC2 cercana a cero (más estabilidad). De manera similar, los ambientes ideales de prueba deben tener gran puntuación PC1 (más discriminación de los cultivares) y puntuaciones PC2 cercana a cero (más representativas de un promedio de ambientes). En este caso la localidad más representativa es L1 (San José de Mojarras).

Conclusiones

Las poblaciones P1, P3 y P4 fueron las que presentaron una baja interacción población x localidad, en tanto que P5, UAN-2009C, y los híbridos varietales 13XT y 8XT presentaron valores altos de interacción. La localidad que mejor discrimino a los ambientes fue San José de Mojarras.

En el modelo Biplot GGE-SREG identificó a la población P7 (UAN-2008) como la de mayor capacidad de adaptación en las localidades de prueba.

En general, pudo observarse que la población que presento menor interacción fue P3, y la que contribuyó más a la misma fue P5. La mayor variación fue atribuible a los efectos de localidad.

- Cornelius, P. L., & Crossa. J. 1999. Prediction assessment of shrinkage estimators of multiplicative models for multi-environment cultivar trials. *Crop Science*. 99(4): 998-1009. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900040007x>
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multilocation trial. *Advances in Agronomy*. 44: 55-85. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60818-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60818-4)
- Crossa, J., & Cornelius. P.L. (1997). Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variance. *Crop Science* 37: 406-415. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020017x>
- Crossa, J. & Cornelius. P. L. (2000). Modelos lineales bilineales para el análisis de ensayos de genotipos en ambientes múltiples. In: Simposium: Interacción Genotipo x Ambiente. XIII Congreso Nacional de Fitogenética. Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C. 15-20 de octubre. Irapuato, México. pp: 61-88.
- Crossa J., Burgueño, J., Cornelius, P. L., McLaren, G., Trethowan, R. and Krishnamachari. A. (2006). Modeling genotype x environment interaction using additive genetic covariances of relatives for predicting breeding values of wheat genotypes. *Crop Science* 46(4): 1722-1733. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.11-0427>
- Fuentes, L. M. R. & Quemé. W. (2005). Evaluación de híbridos de maíz de gano amarillo y blanco en diferentes ambientes de México y Centro América. Informe del PCCMA Guatemala Abril 2005.
- Gauch, H. G. (2006). Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Science* 46: 1488-1500. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193>
- Gauch, H. G. (1998). Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44: 705-715. <https://doi.org/10.2307/2531585>
- Gauch, H. G. & Zobel. R. W. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Resumen de Crop Science* 37: 311-326. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020002x>
- Gauch, H. G. & Zobel. R. W. (1988). Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. *Theoret. Appl. Genetics*. 76: 1-10pp. <https://doi.org/10.1007/BF00288824>
- Glaz B. & Kang, M. S. (2008). Location contributions determined via GGE biplot analysis of Multienvironment sugarcane genotype-performance trials. *Crop Science* 48: 941-950. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.06.0315>
- Gordón-Mendoza R, I., Camargo-Buitrago, J., Franco-Barrera, A. and González-Saavedra (2006). Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17(2): 189-199. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43717206>
- Ibañez, M.A., Cavanagh, M.M., Bonamico, N.C., and Renzo, M.A. di. (2006). Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 35(3): 89-93. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86435306>
- Kempton, R. A. (1984). The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *Journal of Agricultural Science* 103: 123-135pp. <https://doi.org/10.1017/S0021859600043392>
- Lozano Ramírez A., Santacruz Varela. A., San Vicente García. F., Crossa. J., Burgueño, J. and Molina Galán, J. D. (2015). Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:(4) 337-347. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400001
- McDermott B. & Coe R. (2012). An Easy Introducción to Biplots for Multienvironment Trials. Statistical Services Centre, University of Reading, UK and World Agroforestry Centre, Kenya. 62 p. <http://www.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/MN17359.pdf>
- Medina, S., Marín, C., Segovia, V., Bejarano, A., Venero, Z., Ascanio, R. and Meléndez. E. (2002). Evaluación de la estabilidad del rendimiento de variedades de maíz en siete localidades de Venezuela. *Agronomía Tropical* 52(3): 255-275. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2002000300001
- Palemón, A. F., Gómez, M. N. O., Castillo, G. F., Ramírez, V. P., Molina, G. J. D. and Miranda C. S. (2012). Estabilidad de cruzas intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia*. 46. 133-145. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000200004

- Sánchez Ramírez F. J., Mendoza Castillo M.C. and Mendoza Castillo, C. G. (2016). Estabilidad fenotípica de cruas simples e híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 39(3): 269-275. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39-3/10r.pdf>
- SAS (La Sociedad por Acciones Simplificada). (2002). SAS versión 9.1.3 help and documentation. Cary, NC, SAS Institute Inc.
- Vargas, M. & Crossa, J. (2000). The AMMI Analysis and Graphing the Biplot. Biometrics and Statistical Unit, CIMMYT. México. 42 p.
- Yan, W., Hunt, A., Sheng, Q. and Szlavnicz, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*. 40: 597-605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Yan W., Cornelius, P. L., Crossa, J. and Hunt, L. A. (2001). Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Science* 41: 656-663. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.413656x>
- Yan, W. & Rajcan, I. (2002). Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*. 42: 11-20. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1100>
- Zobel, R. W., Wright, M. and Gauch, H. G. (1998). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*. 80: 388-393. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>