



INTERACCIÓN GENOTIPO × AMBIENTE PARA EFICIENCIA EN EL USO DE FÓSFORO EN MAÍZ NATIVO DE LA MESETA P'URHÉPECHA

GENOTYPE × ENVIRONMENT INTERACTION FOR PHOSPHORUS USE EFFICIENCY IN MAIZE NATIVE TO THE P'URHEPECHA PLATEAU

Jeannette S. Bayuelo-Jiménez^{1*} e Iván Ochoa-Cadavid²

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. km 9.5 Carr. Morelia-Zinapécuaro. 58880, Tarímbaro, Michoacán. México. ²Subdirección de Investigación y Desarrollo, Unipalma de los Llanos S. A., Hacienda Santa Bárbara, km 25 vía La Estaca-Veracruz, Meta, Colombia.

*Autor para correspondencia (bayuelo@umich.mx)

RESUMEN

La deficiencia de fósforo (P) reduce la productividad agrícola. La identificación y selección de cultivares estables y con mayor eficiencia en el uso de fósforo (EUP) puede representar una solución más sostenible que aquella que depende solamente de la aplicación de fertilizantes fosfatados. Se estudió la interacción genotipo por ambiente (IGA) y estabilidad de la eficiencia en el uso de P (EUP), eficiencia en la adquisición de P (EAP) y eficiencia en la utilización de P (EUTP) de 25 genotipos de maíz nativo y dos testigos, cultivados en cinco localidades de la Meseta P'urhépecha de Michoacán, en suelos con deficiencia de P, con dosis de fertilización reducida (25 kg P₂O₅ ha⁻¹) (BP) y alta (50 kg P₂O₅ ha⁻¹) (AP). Los resultados para la EUP, EAP y EUTP fueron analizados mediante el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI). El análisis de varianza para EUP, EAP y EUTP mostró que los efectos de ambientes, genotipos y la IGA fueron significativos, lo que indica que los genotipos respondieron diferencialmente a los cambios de los ambientes o los ambientes probados discriminaron diferencialmente a los genotipos, o ambos. En condiciones de limitada disponibilidad de P en el suelo ácido, la EAP y EUTP fueron factores que explicaron la variación en la EUP. La mayor EUP se asoció con una mejor distribución de la biomasa de la planta y un mayor índice de acumulación de P en la semilla. Los genotipos con mayor EUP y estables en ambientes de reducida disponibilidad de P (BP) fueron Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho-I-04 [234] y el criollo de la región [242]. Los ambientes de Erongarícuaro y Charahuén mostraron la menor IGA y podrían ser las mejores localidades para discriminar genotipos con mayor EUP. El germoplasma de maíz de la Meseta P'urhépecha tiene variación genotípica y estabilidad fenotípica para EUP en suelos ácidos.

Palabras clave: *Zea mays*, suelo ácido, eficiencia en el uso de fósforo, interacción genotipo-ambiente, estabilidad.

SUMMARY

Phosphorus (P) deficiency reduces agricultural productivity. The identification and selection of stable cultivars with greater P use efficiency may represent a more sustainable solution than the one that depends only on the application of phosphate fertilizers. The genotype by environment interactions (GEI) and the stability of the P use efficiency (PUE), P acquisition efficiency (PAE) and P use efficiency (PUSE) were assessed on 25 native maize landraces and two controls. All samples were grown in five localities of the P'urhépecha Plateau of Michoacán, in soils with P deficiency simulated with reduced (25 kg P₂O₅ ha⁻¹) (RP) and high (50 kg P₂O₅ ha⁻¹) (HP) fertilization doses. The results for PUE, PAE and PUSE were analyzed by using the additive main effects and multiplicative interactions model (AMMI). Pooled analysis of variance for

PUE, PAE, and PUSE showed that the effects of environments, genotypes and the GEI were significant, which indicates that the genotypes responded differentially to the changes of the environments or that the tested environments differentially discriminated the genotypes, or both. Under conditions of limited availability of P in acid soil, both PAE and PUSE were factors that explained the variation in PUE. A higher efficiency of P was associated with a better distribution of biomass of the plant and a higher rate of accumulation of P in the seed. The genotypes with higher PUE and stable in environments of reduced availability of P (RP) were Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho-I-04 [234] and a regional landrace [242]. The environments of Erongarícuaro and Charahuén showed the lowest GEI, and those could be the best locations to discriminate genotypes with higher PUE. Maize germplasm from the P'urhépecha Plateau has genotypic variation and phenotypic stability for PUE in acidic soils.

Index words: *Zea mays*, acidic soil, phosphorus use efficiency, genotype-environment interaction, stability.

INTRODUCCIÓN

La Subprovincia Neovolcánica P'urhépecha en Michoacán constituye uno de los centros más diversos de razas de maíz en México (Mijangos-Cortés *et al.*, 2007). En esta región, el cultivo de maíz se realiza en condiciones de temporal, en pequeñas unidades de producción y en suelos con una reducida disponibilidad de fósforo (P) (SIAP, 2016). La sostenibilidad de los sistemas agrícolas de esta región requiere de la identificación y desarrollo de genotipos eficientes para adquirir y utilizar el P del suelo o del fertilizante (Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2014).

El mejoramiento genético para la eficiencia en el uso del fósforo (EUP), definida como el incremento de la producción de materia seca o rendimiento por unidad del nutriente absorbido (Richardson *et al.*, 2011) se ha realizado con variedades mejoradas derivadas de una reducida colección de germoplasma y predominantemente adaptadas a una agricultura intensiva y ambientes óptimos (Manschadi *et al.*, 2014). En contraste, las variedades tradicionales de maíz que se han desarrollado en ambientes con reducida disponibilidad de nutrientes representan una

fueron una fuente importante de diversidad para la selección de genotipos adaptados a sistemas rurales (Newton *et al.*, 2010). Las variedades nativas de la Meseta P'urhépecha están adaptadas a ambientes de reducida fertilidad y poseen características en la raíz que no es común encontrar en el germoplasma élite (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2011). Las variedades eficientes para el uso de P poseen raíces axilares (nodales) más superficiales y ramificadas que permiten absorber el P presente en la parte superficial del suelo y tener mayor crecimiento durante la etapa vegetativa (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2011). La EUP también se manifiesta en una mejor distribución de materia seca y P en la planta (Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2014).

La EUP es una característica regulada por efectos genéticos, fisiológicos y ambientales (Manschadi *et al.*, 2014). Para mejorar la EUP es importante explorar la variación genética de sus componentes, identificar los genotipos de mayor estabilidad y evaluar la interacción del genotipo con su ambiente (IGA) (Zobel *et al.*, 1988). Varios investigadores han demostrado que uno de los mejores modelos estadísticos para el análisis de estabilidad y la interacción genotipo por ambiente (IGA) es el modelo AMMI, que significa modelo de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (Vargas y Crossa, 2000). Diversos estudios han demostrado la efectividad de esta metodología en la descripción de la IGA en poblaciones de maíz nativo (Arellano *et al.*, 2014; Martínez-Sánchez *et al.*, 2016). El objetivo de este estudio fue evaluar la interacción genotipo × ambiente para determinar la eficiencia en el uso de fósforo y sus componentes de adquisición (EAP) y utilización (EUtP) de 27 variedades de maíz y su grado de estabilidad en diferentes condiciones agroecológicas de la Meseta P'urhépecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se realizó en condiciones de temporal, de mayo a diciembre de 2014. Las parcelas experimentales se ubicaron en las localidades de Charahuén (19° 31' LN, 101° 42' LO), Erongarícuaro (19° 35' LN, 101° 43' LO), Charapan (19° 39' LN, 102° 15' LO), Pichátaro (19° 34' LN, 101° 40' LO) y Nahuátzen (19° 65' LN, 101° 91' LO), en el estado de Michoacán. El clima es templado sub-húmedo con lluvias en verano [C (w2) (w)], con temperatura media anual de 22 °C y altitud de 2260 a 2414 m (Muñoz, 2003). El suelo es un Andisol vítrico (Soil Survey Staff, 1999) con alto contenido de materia orgánica (2.6 a 3.2 %), pH de 5.2 a 6.5 y alta capacidad de intercambio catiónico (12 a 75 cmol kg⁻¹). El P disponible varió de 1.2 a 7.5 mg P kg⁻¹.

Material experimental y tratamientos

Los experimentos incluyeron dos niveles de fertilización en cada localidad, generándose 10 tratamientos, los cuales se denominarán como ambientes; dosis baja (25 kg ha⁻¹) y alta (50 kg ha⁻¹) de aplicación de P₂O₅ como superfosfato de calcio triple. Se usaron 25 genotipos de maíz del programa de mejoramiento del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) e integrados por genotipos nativos de la Meseta P'urhépecha, así como maíces mejorados de amplia base genética, además de dos testigos (cv. Ocelote y un genotipo de maíz nativo de la región). Los materiales se clasificaron como: precoces (de 75 a 80 d a floración masculina, dfm, 5 materiales), intermedios (de 85 a 95 dfm, 10 materiales) y tardíos (de 95 a 110 dfm, 10 materiales).

Diseño y unidad experimental

Se empleó un diseño 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, 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. Las semillas se sembraron a 6 cm de profundidad a una distancia de 60 cm entre plantas. A todas las unidades experimentales se les aplicó una dosis de 60 kg N ha⁻¹ en forma de urea a la siembra y 60 kg N ha⁻¹ 42 d después de la siembra.

Variables evaluadas

Se evaluó el rendimiento de grano (RG) ajustado a 14 % de humedad, reportado en t ha⁻¹ considerando la proporción de grano en la mazorca y el factor que lo extrapola a la superficie de una hectárea. Se evaluó la materia seca acumulada en el vástago (MSV) (hojas + tallo + espiga); el vástago de cada conjunto de 10 plantas/unidad experimental se deshidrató en una estufa a 65 °C por 72 h, para luego registrar el peso seco total acumulado (Bt). El tejido seco se molió en un molino Wiley-Thomas con una malla de 1 mm y se utilizaron sub-muestras de 70 mg para calcinarlas en una mufla (CEM®, Modelo MAS-7000, Matthews, NC, EUA) a 500 °C por 8 h. La estimación de la concentración de P en la semilla (PS) y vástago (PV) se realizó por colorimetría mediante la reacción con una solución de molibdato [(NH₄)₆Mo₇O₂₄] y su medición en un espectrofotómetro de UV/VIS (Perkin Elmer®, Modelo Lambda 40, Uberlingen, Alemania) a una longitud de onda de 880 nm (Murphy y Riley, 1962). Se calculó el contenido de P en la semilla (CPS) y vástago (CPV) (kg P ha⁻¹) mediante la multiplicación de la concentración de P (g P kg⁻¹) por la materia seca acumulada en cada órgano. El P total (Pt) se obtuvo como la suma de CPS + CPV.

Se obtuvieron dos grupos de variables de eficiencia de las medias ajustadas de cada combinación tratamiento × localidad (Ortíz-Monasterio *et al.*, 2001). El primer grupo comprendió las variables de eficiencia en la adquisición (EAP) y en utilización de P (EUtP), las cuales se usaron para calcular la EUP como sigue: $EAP = [Pt/P_{\text{aplicado}} \text{ (kg P en la planta a madurez por kg de fertilizante aplicado)}]$ y en la utilización de P, $EUtP = RG/Pt \text{ (kg de grano producido por kg de P en la planta)}$. La EUP ($RG/P \text{ aplicado}$) se determinó como el producto de EAP por EUtP. El segundo grupo comprendió dos variables, el índice de cosecha (IC) e índice de acumulación de P (IAP), que se usaron para calcular EUtP como: $IC = RG/Bt \text{ (kg de semilla por kg de peso seco total)}$ y el $IAP = Ps/Pt \text{ (kg de P en la semilla por kg de P en la planta)}$.

Análisis estadístico

En el análisis de la interacción genotipo por ambiente (IGA) de la EUP, EAP y EUtP se consideraron 10 ambientes, resultado de la combinación de las cinco localidades y los dos niveles de P usados, mediante el modelo AMMI (Vargas y Crossa, 2000). Se utilizó el modelo desarrollado por Dia y Wehner (2015) para estimar el valor de estabilidad AMMI (ASV). Finalmente se realizó un análisis de correlación entre las variables evaluadas.

RESULTADOS

Estabilidad de la eficiencia en el uso de fósforo (EUP)

El análisis de varianza combinado para EUP mostró que los efectos de ambientes, genotipos y la interacción

genotipo por ambientes (IGA) fueron significativos ($P \leq 0.001$) (Cuadro 1). El 69 % de la suma de cuadrados (SC) fue atribuible a efectos ambientales, mientras que los efectos genotípicos y la IGA representaron el 8 y 23 %, respectivamente. Al descomponer la SC de la IGA en componentes de interacción (CI) mediante la descomposición del valor singular, se constató que los valores singulares asociados a los tres primeros ejes fueron significativos en la explicación de la variabilidad de la IGA, al acumular entre los tres 80.6 % de la variabilidad total (Cuadro 1). El CI1 explicó 54.8 % de la SC de la interacción, mientras que los CI2 y CI3 sólo representaron el 14.8 % y 11 % de dicha SC, por lo que el CI1, CI2 y CI3 constituyen valores representativos para el estudio de la estabilidad de la EUP evaluada (Farshadfar, 2008).

De acuerdo con Thangavel *et al.* (2011), la distancia del origen (0,0) es indicativo de la proporción de la interacción de los genotipos a través de ambientes o de ambientes a través de genotipos; aquellos que presentan valores cercanos a cero tienen poca interacción o presentan mayor estabilidad. La Figura 1A muestra que los genotipos con baja IGA (más estables) fueron Santa Clara [115], H-7545 [117], DP × Tromba [127] y Macho-I-04 [234] con EUP superiores a la media de 164 kg kg P⁻¹. Los genotipos con baja IGA y con una EUP inferior a la media fueron ZPT-2 [17], TZU-7 [99], CIMMYT-1 [185], El Tigre [189] y NACI-1 [193]. En contraste, los genotipos PICH-1 [62], CB-2 [63], ZR-6 [75], Cruz Gorda [140], CCHEDÉ [199], Tepetate [206], Macho-IV-05 [241] y cv. Ocelote [243] presentaron un comportamiento altamente interactivo que denota su mejor comportamiento en el ambiente en que fueron probados.

Cuadro 1. Partición de la suma de cuadrados del modelo AMMI de los 27 genotipos de maíz cultivados en cinco localidades bajo dos niveles de aplicación de P (10 ambientes) de la Meseta P'urhépecha.

| Fuente de variación | gl | EUP | EUtP | EAP |
|---------------------|------|---------------|----------------|-----------|
| Tratamientos | 269 | 7,500,437 *** | 27,454,084 *** | 47.08 *** |
| Ambiente | 9 | 5,156,914 *** | 8,380,103 *** | 26.83 *** |
| Genotipo | 26 | 602,120 *** | 10,067,714 *** | 11.07 *** |
| Ambiente × Genotipo | 234 | 1,741,402 *** | 9,006,266 *** | 9.18 *** |
| CI1 | 34 | 954,253 *** | 2,761,604 *** | 3.16 *** |
| CI2 | 32 | 257,145 *** | 1,651,098 *** | 2.80 *** |
| CI3 | 30 | 191,557 *** | 1,172,554 *** | 1.58 *** |
| Residual | 138 | 112,897 | 1,715,645 | 0.68 |
| Error | 780 | 648,169 | 6,371,272 | 4.45 |
| Total | 1079 | 8,240,098 | 34,289,854 | 51.79 |

*** Significativo a $P \leq 0.001$; gl: grados de libertad.

Las localidades de Erongarícuaro (ERB) y Charahuén (CHB) se caracterizaron como ambientes de alta EUP. Por la longitud de los vectores, el ambiente que mejor discriminó a los genotipos en la evaluación fue ERB, seguido de Charahuén (CHB), Pichátaro (PIB) y Nahuátzen (NAB) en BP; en cambio, las localidades de Charahuén (CHA) y Nahuátzen (NAA) no discriminaron bien entre genotipos. Los 10 ambientes donde se evaluaron los genotipos formaron tres grupos (Cuadro 2): el primero agrupó a ERB y CHB, con EUP media de 326.7 y 259.3 kg kg P⁻¹, el segundo a PIB y NAB con medias de 247.6 y 246.6 kg kg P⁻¹ y el tercero al resto de los ambientes con la EUP más baja (69.9 a 167 kg kg P⁻¹). De acuerdo con la media de la EUP a través de ambientes y valores absolutos de CI1 (positivos), CI2 (cercano a cero) y valor de estabilidad ASV-AMMI (Cuadro 3), los genotipos Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho-I-04 [234] y el criollo de la región [242] fueron los más estables a través de ambientes. Purchase et

al. (2000) señalan que entre menor sea el valor del índice de estabilidad, mayor será la adaptación de los genotipos a los diversos ambientes.

Estabilidad de la eficiencia en la utilización de fósforo (EUTP)

En la eficiencia en la utilización de fósforo (EUTP), el modelo AMMI mostró significancia en CI1, CI2 y CI3, componentes que explicaron el 62 % de la SC de la interacción (30.7, 18.3 y 13 %, respectivamente) (Cuadro 1). Los genotipos con valores de CI1 mayores a cero a través de todos los ambientes fueron TZU-7 [99], Paso del Muerto-1 [109], HV-313 × DE [135], Macho III-04 [181], CIMMYT-1 [185], El Tigre [189], CCHEDÉ [199], Macho-I-04 [234], Macho-II-03 [236] y cv. Ocelote [243], con una EUTP mayor a la media general (492.2 kg grano kg P⁻¹) (Figura 1B). Los genotipos con una baja IGA y una EUTP inferior a la media fueron SHUI-2

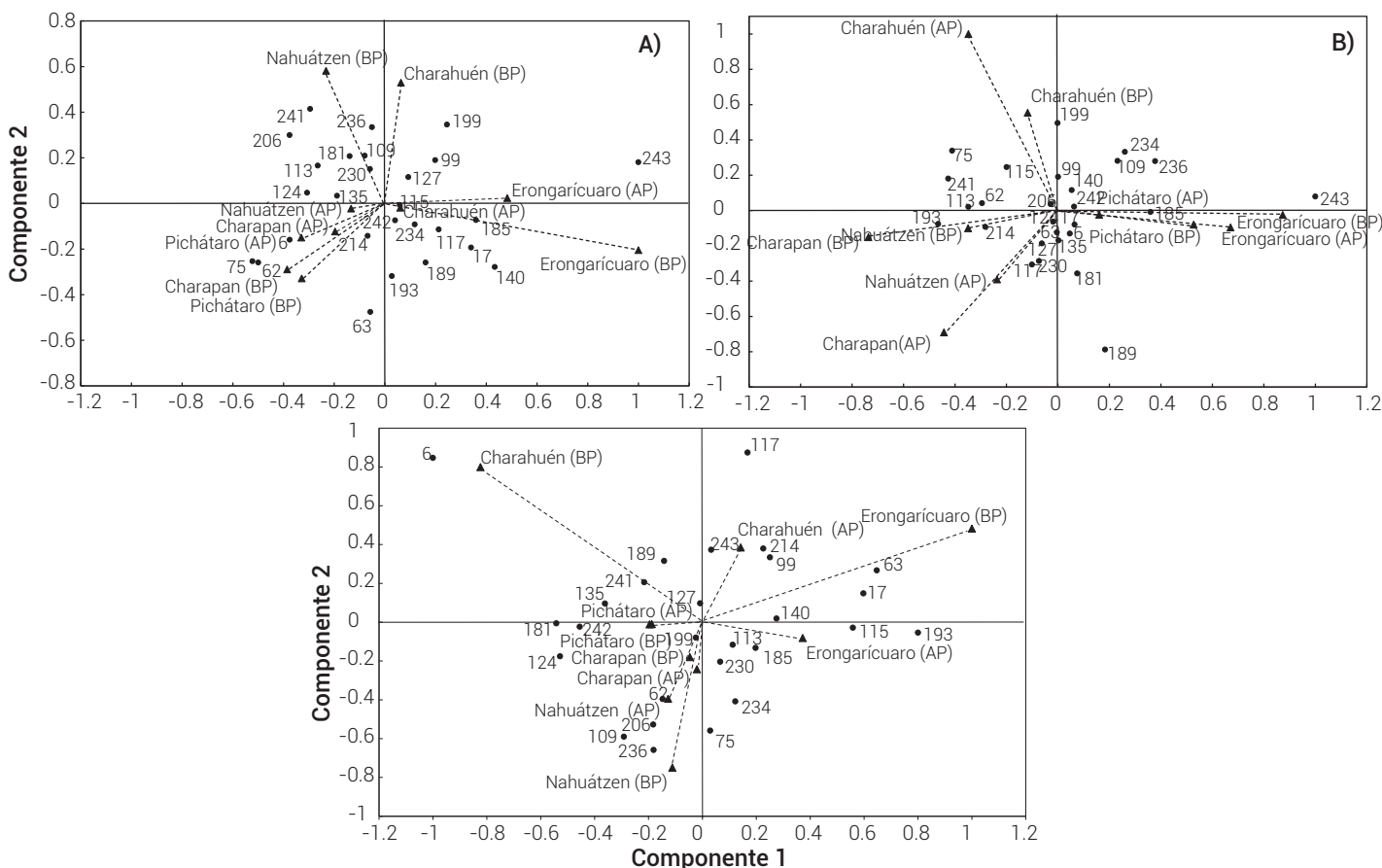


Figura 1. Biplot del modelo AMMI para EUP (A), EUTP (B) y EAP (C) en 27 genotipos de maíz evaluados en cinco localidades bajo dos dosis de fertilización de P (10 ambientes) de la Meseta P'urhépecha. Los números representan los genotipos SHUI-2 [6], ZPT-2 [17], PICH-1 [62], CB-2 [63], ZR-6 [75], TZU-7 [99], Paso del muerto-1 [109], Paso del muerto-1 [113], Santa Clara [115], H-7545 [117], Corupo [124], DP × Tromba [127], HV-313 × DE [135], Cruz Gorda [140], Macho III-04 [181], CIMMYT-1 [185], El Tigre [189], NACI-1 [193], CCHEDÉ [199], Tepetate [206], Mojonera [214], Macho II-04 [230], Macho-I-04 [234], Macho-II-03 [236], Macho-IV-05 [241], Criollo de la región [242] y cv. Ocelote [243].

Cuadro 2. Eficiencia en el uso de fósforo (EUP) y sus componentes de utilización (EUTP) y adquisición (EAP) de maíz cultivado en cinco localidades bajo dos dosis de fertilización de P (10 ambientes) de la Meseta P'uhépecha.

| Variable | ID | Charahuén | | Charapan | | | Erongarícuaro | | Pichátaro | | Nahuátzen | | DMS [†] |
|-------------------------------------|----------------|-------------------|-------|----------|-------|-------|---------------|-------|-----------|-------|-----------|------|------------------|
| | | CHA ⁺⁺ | CHB | CPA | CPB | ERA | ERB | PIA | PIB | NAA | NAB | | |
| EUP (kg kg P ⁻¹) | E [†] | 148.5 | 259.3 | 69.9 | 151.2 | 167.5 | 326.7 | 121.5 | 247.6 | 123.1 | 246.6 | 22.9 | |
| | ME | 131.4 | 241.8 | 55.4 | 117.2 | 150.6 | 281.3 | 104.4 | 203.1 | 103.7 | 210.1 | 13.9 | |
| EUTP (kg grano kg P ⁻¹) | I | 103.6 | 230.1 | 58.2 | 125.4 | 119.6 | 277.8 | 95.7 | 220.9 | 103.6 | 187.9 | 18.3 | |
| | E | 455.7 | 439.1 | 497.3 | 526.5 | 514.1 | 498.5 | 617.3 | 669.7 | 396.6 | 423.7 | 56.5 | |
| EAP (kg P kg P ⁻¹) | ME | 428.3 | 462.8 | 513.3 | 491.4 | 426.7 | 544.1 | 651.0 | 725.5 | 387.1 | 416.7 | 49.5 | |
| | I | 387.7 | 424.8 | 393.7 | 446.9 | 413.3 | 434.7 | 547.3 | 609.9 | 310.8 | 365.5 | 53.6 | |
| EAP (kg P kg P ⁻¹) | E | 0.35 | 0.64 | 0.14 | 0.29 | 0.35 | 0.71 | 0.20 | 0.38 | 0.33 | 0.59 | 0.05 | |
| | ME | 0.32 | 0.56 | 0.13 | 0.23 | 0.31 | 0.60 | 0.17 | 0.41 | 0.29 | 0.47 | 0.03 | |
| EAP (kg P kg P ⁻¹) | I | 0.25 | 0.58 | 0.19 | 0.26 | 0.34 | 0.58 | 0.21 | 0.29 | 0.37 | 0.43 | 0.04 | |

[†]Grupos de estabilidad: Estable (E), Moderadamente estable (ME), Inestable (I) derivados del análisis del modelo AMMI con 7, 13 y 7 genotipos, respectivamente. ⁺⁺Las primeras dos letras representan la localidad, mientras que ambientes con alta (AP) y baja (BP) P de cada localidad está representado con la letra A y B, respectivamente. [†]DMS: Diferencia mínima significativa a P ≤ 0.05.

[6], ZPT-2 [17], CB-2 [63], Cruz Gorda [140] y Criollo [242]; en contraste, los genotipos ZR-6 [75], El Tigre [189], NACI-1 [193], CCHEDÉ [199], Macho-IV-05 [241] y cv. Ocelote [243] presentaron un comportamiento altamente interactivo. De acuerdo con el parámetro de estabilidad ASV-AMMI, los genotipos más estables a través de ambientes fueron TZU-7 [99], HV-313 × DE [135], Cruz Gorda [140] y Criollo de la región [242] (Cuadro 3).

La EUTP difirió entre localidades y disminuyó como resultado de la adición de P (Cuadro 2). Las localidades Pichátaro (PIA y PIB) seguidas de Erongarícuaro (ERA y ERB) discriminaron bien entre genotipos. La mayor EUTP para ambos ambientes se obtuvo en Pichátaro en los genotipos Paso del Muerto-1 [109], Macho III-04 [181], El Tigre [189], Macho-I-04 [234], Macho-II-03 [236] y cv. Ocelote [243] con una media de 617 y 669 kg grano kg P⁻¹ en AP y BP (Cuadro 2). Estos genotipos produjeron más kg de semilla por cada kg de P absorbido.

Estabilidad de la eficiencia en la adquisición de fósforo (EAP)

El análisis AMMI para la EAP mostró que el 23.5 % de la SC total fue atribuible a efectos genotípicos, mientras que los efectos ambientales y la IGA representaron 57 y 19.5 % (Cuadro 1). En la EAP los tres primeros CI fueron significativos. El CI1 explicó el 34.5 % de la SC de la IGA y los CI2 y CI3 31 y 17 %, respectivamente. La EAP fue significativamente mayor en las localidades de Erongarícuaro (ERB) y Charahuén (CHB) (Cuadro 2) y disminuyó con el incremento de fertilización. Ambas localidades discriminaron bien entre genotipos. Los genotipos Paso del Muerto-2 [113], Cruz Gorda [140] y Macho II-04 [230] presentaron los valores absolutos más bajos del CP2, por lo que se consideran los más estables en cuanto a EAP (Figura 1C, Cuadro 3). El genotipo ZR-6 [75] fue el de mayor EAP a través de ambientes (0.73 kg P kg P⁻¹), seguido del genotipo H-7545 [117] (0.52 kg P kg P⁻¹) (datos no mostrados).

Rendimiento y variables de fósforo

Se encontraron diferencias significativas (P ≤ 0.001) para el rendimiento de grano (RG) y de vástago (RV), índice de cosecha (IC), concentración y contenido de P en vástago (PV y CPV) y semilla (PS y CPS) e índice de cosecha de fósforo (ICP) entre localidades, grupos de estabilidad y por efecto de la interacción de ambos factores (Cuadro 4). El RG, RV y CPV fueron mayores en los genotipos estables cultivados en los ambientes de Charahuén y Erongarícuaro en BP y AP. La PS fue mayor en los genotipos cultivados en los ambientes de Charapan y Pichátaro en BP y AP.

La deficiencia de P fue un factor limitante para el RG

Cuadro 3. Componentes de interacción (CI1 y CI2) y valor de estabilidad ASV-AMMI para la eficiencia en el uso de fósforo (EUP) y sus componentes de utilización (EUP) y adquisición (EAP) de variedades de maíz de la Meseta P'urhépecha.

| ID | Genotipo | Media | CI1 | CI2 | ASV [†] | Ordenamiento ^{††} |
|------------------------------------|----------------------|-------|------|-------|------------------|----------------------------|
| EUP (kg kg P ⁻¹) | | | | | | |
| 242 | Criollo de la Región | 193.9 | 0.04 | -0.07 | 0.17 | 1 |
| 115 | Santa Clara | 182.0 | 0.06 | -0.01 | 0.22 | 2 |
| 127 | DP × Tromba | 175.7 | 0.09 | 0.12 | 0.36 | 6 |
| 234 | Macho-I-04 | 164.6 | 0.12 | -0.09 | 0.45 | 9 |
| EUP (kg grano kg P ⁻¹) | | | | | | |
| 242 | Criollo de la Región | 454.6 | 0.06 | 0.02 | 0.11 | 3 |
| 140 | Cruz Gorda | 462.4 | 0.05 | 0.12 | 0.15 | 6 |
| 135 | HV-313×DE | 542.4 | 0.00 | -0.17 | 0.17 | 8 |
| 99 | TZU-7 | 526.2 | 0.00 | 0.19 | 0.19 | 9 |
| EAP (kg P kg P ⁻¹) | | | | | | |
| 113 | Paso del Muerto 2 | 0.45 | 0.11 | -0.12 | 0.17 | 3 |
| 230 | Macho-II-04 | 0.35 | 0.07 | -0.20 | 0.22 | 4 |
| 140 | Cruz Gorda | 0.35 | 0.28 | 0.02 | 0.31 | 6 |

[†]ASV: valor de estabilidad de AMMI (por sus siglas en inglés). ^{††}Ordenamiento del valor de estabilidad (ASV).

(Cuadro 4). Con una dosis alta de fertilización, la concentración de P en el suelo (Bray 1) 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, nivel inferior al requerido para un adecuado crecimiento del maíz (15 a 20 mg P kg⁻¹) (Setiyono *et al.*, 2010). Esta respuesta se relaciona con la alta capacidad de adsorción del P y la sub-óptima concentración del P inorgánico en la solución del suelo [0.007 (-P), 0.008 (+P) mg P L⁻¹; Manske *et al.*, 2001].

La concentración de P en la semilla fue menor que la del vástago en todas las localidades, excepto en los genotipos cultivados en Charapan (CPA y CPB). El contenido de P en el vástago fue mayor que el contenido en la semilla, particularmente en AP. En los genotipos estables, el contenido de P promediado a través de localidades para el vástago fue de 1.47 y 1.63 kg P ha⁻¹ en AP y BP, respectivamente (datos no mostrados). El índice de cosecha de P (ICP) varió entre localidades y grupos de estabilidad y fue de 0.26 a 0.39 en AP y de 0.18 a 0.41 en BP. La mayoría de los genotipos estables tuvieron un bajo ICP, excepto en Pichátaro y Charapan, debido a la mayor concentración de P en semilla. Los genotipos estables alcanzaron un ICP de 0.44 a 0.48 en BP.

Correlación entre variables

La correlación fenotípica más alta ($P \leq 0.001$) se observó entre PS e ICP ($r = 0.89$; $r = 0.86$, para BP y AP,

respectivamente). La correlación significativa entre EUP e IC ($P \leq 0.001$) ($r = 0.80$; $r = 0.85$, para BP y AP, respectivamente) fue mayor que la correlación entre EUP e ICP ($r = 0.53$; $r = 0.63$, para BP y AP) ($P \leq 0.05$). La correlación entre EAP y RG fue significativa ($P \leq 0.01$) ($r = 0.75$; $r = 0.82$, para BP y AP) al igual que la correlación entre EAP y PS ($r = -0.78$; $r = -0.85$, para BP y AP) y aquella entre EAP e ICP ($r = -0.78$; $r = -0.85$, para BP y AP) ($P \leq 0.01$). La correlación de EAP y EUP en condiciones de AP y BP fue significativa y negativa ($r = -0.59$; $r = -0.53$) ($P \leq 0.05$). Los resultados indican que la selección de estas características podría no ser efectiva en ambas dosis de aplicación de P.

DISCUSIÓN

La variación intra-específica de la EUP del maíz nativo se debió a las variaciones de la EAP y EUP en ambas dosis, BP y AP. La EUP representa la cantidad de semilla producida por unidad de P absorbido en la planta a madurez fisiológica (Ortíz-Monasterio *et al.*, 2001). La EUP para genotipos estables varió de 396 a 670 kg grano kg P⁻¹ (Cuadro 2). El valor promedio coincide con lo reportado en variedades modernas de maíz (172 a 1157 kg grano kg P⁻¹) (Setiyono *et al.*, 2010). La EUP es dependiente del índice de cosecha (IC), índice de cosecha de P (ICP), concentración de P en la semilla (PS) y de la biomasa total (Bt) ($EUP = RG/Pt = IC/Bt = ICP/PS$) (Manske *et al.*, 2001). Así que, el incremento en el IC o ICP, o la reducción de la Bt o PS aumentan la EUP. En este estudio, la mayor EUP se

Cuadro 4. Rendimiento de grano y parámetros de P de maíz cultivado en cinco localidades bajo dos dosis de fertilización de P (10 ambientes).

| Variable | ID | Charahuén | | Charapan | | Erongarícuaro | |
|--|----------------|-------------------|------|-----------|------|---------------|------|
| | | CHA ^{††} | CHB | CPA | CPB | ERA | ERB |
| RG (t ha ⁻¹) | E [†] | 3.41 | 2.91 | 1.60 | 1.73 | 3.83 | 3.75 |
| | I | 2.38 | 2.61 | 1.34 | 1.44 | 3.75 | 3.19 |
| RV (t ha ⁻¹) | E | 7.33 | 6.59 | 3.82b | 3.83 | 9.79 | 8.70 |
| | I | 6.03 | 5.25 | 5.21 | 4.30 | 8.24 | 8.73 |
| IC (kg semilla kg Bt ⁻¹) | E | 0.32 | 0.20 | 0.29 | 0.31 | 0.28 | 0.30 |
| | I | 0.29 | 0.18 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.27 |
| PS (g P kg ⁻¹) | E | 0.48 | 0.49 | 0.92 | 0.92 | 0.28 | 0.42 |
| | I | 0.44 | 0.42 | 0.87 | 0.91 | 0.26 | 0.39 |
| PV (g P kg ⁻¹) | E | 0.93 | 0.92 | 0.49 | 0.47 | 0.73 | 0.72 |
| | I | 1.77 | 0.94 | 0.59 | 0.52 | 0.86 | 0.82 |
| CPS (kg P ha ⁻¹) | E | 1.47 | 1.42 | 1.48 | 1.64 | 1.09 | 1.62 |
| | I | 1.05 | 1.10 | 1.20 | 1.31 | 0.73 | 1.18 |
| CPV (kg P ha ⁻¹) | E | 6.48 | 5.29 | 1.84 | 1.72 | 6.95 | 6.52 |
| | I | 4.74 | 5.56 | 3.2 | 2.19 | 7.07 | 7.22 |
| ICP (kg P semilla kg P ⁻¹) | E | 0.19 | 0.20 | 0.45 | 0.48 | 0.13 | 0.20 |
| | I | 0.20 | 0.18 | 0.35 | 0.39 | 0.11 | 0.16 |
| | ID | Pichátaro | | Nahuátzen | | DMS* | |
| | | PIA | PIB | NAA | NAB | | |
| RG (t ha ⁻¹) | E [†] | 2.79 | 2.84 | 2.82 | 2.83 | 0.33 | |
| | I | 2.20 | 2.54 | 2.34 | 2.11 | 0.25 | |
| RV (t ha ⁻¹) | E | 4.33 | 4.11 | 6.80 | 6.41 | 0.75 | |
| | I | 3.64 | 4.89 | 7.32 | 6.23 | 0.41 | |
| IC (kg semilla kg Bt ⁻¹) | E | 0.39 | 0.41 | 0.29 | 0.23 | 0.03 | |
| | I | 0.35 | 0.38 | 0.26 | 0.19 | 0.02 | |
| PS (g P kg ⁻¹) | E | 0.61 | 0.68 | 0.56 | 0.55 | 0.06 | |
| | I | 0.59 | 0.60 | 0.57 | 0.54 | 0.07 | |
| PV (g P kg ⁻¹) | E | 0.72 | 0.58 | 0.94 | 0.92 | 0.08 | |
| | I | 0.73 | 0.63 | 1.07 | 1.02 | 0.06 | |
| CPS (kg P ha ⁻¹) | E | 1.71 | 1.95 | 1.60 | 1.54 | 0.26 | |
| | I | 1.27 | 1.53 | 1.30 | 1.29 | 0.16 | |
| CPV (kg P ha ⁻¹) | E | 3.01 | 2.44 | 6.06 | 5.31 | 0.84 | |
| | I | 3.60 | 3.25 | 7.33 | 5.90 | 0.51 | |
| ICP (kg P semilla kg P ⁻¹) | E | 0.35 | 0.44 | 0.22 | 0.23 | 0.04 | |
| | I | 0.31 | 0.36 | 0.17 | 0.19 | 0.03 | |

[†]Grupos de estabilidad: Estable (E), Inestable (I) derivados del primero y segundo eje de interacción del análisis AMMI. ^{††}El ambiente con alta (AP) y baja (BP) P de cada localidad está representado con la letra A y B. *DMS: diferencia mínima significativa a P < 0.05.

relacionó con el IC (80 a 85 %) e ICP (48 a 63 %) pero no con la PS (5 a 17 %) y Bt (30 a 33 %).

El índice de cosecha (IC); es decir, la relación entre el rendimiento de semilla y la biomasa total, es uno de los parámetros más usados en la selección de cereales para alto rendimiento (Ortíz-Monasterio *et al.*, 2001). En este estudio, el RG y, en consecuencia, la EUP ($r = 0.43$ y $r = 0.58$) se relacionó con la distribución de la materia seca hacia la semilla. El IC de los genotipos más estables varió de 0.2 a 0.4 en ambos niveles de P, mientras que el IC de los genotipos inestables fue de 0.18 a 0.26 (Cuadro 4). Los valores del IC estuvieron por debajo de lo señalado en las variedades modernas de cultivos de grano (0.4 a 0.6) (Hay, 1995). Hubo una excepción para los genotipos estables de Pichátaro, cuyo IC fue de 0.43 en AP y 0.41 en BP. Este índice es similar al obtenido en variedades eficientes a la absorción de P de la Meseta P'urhépecha (Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2014).

La mayor EUP de los genotipos estables se asoció con el ICP, el cual indica la eficiencia de la planta para utilizar el P adquirido para la producción de semilla. Los resultados demuestran que en ambos niveles de fertilización las diferencias en la EUP se debieron a la variación del ICP (Cuadro 4). En este estudio, el ICP varió de 44 a 48 % entre los genotipos estables de Charapan y Pichátaro: TZU-7 [99], Corupo [124], Cruz Gorda [140] y HV-313 × DEM [135]. Este resultado es similar al ICP de 29 a 35 % obtenido en genotipos eficientes al aprovechamiento de P (Bayuelo-Jiménez y Ochoa-Cadavid, 2014) pero difiere del ICP de 67 a 86 % reportado en otros cultivares de maíz en condiciones de estrés (Setiyono *et al.*, 2010). La correlación negativa entre el CPS y Bt ($r = -0.15$; $r = -0.22$); el CPV e IC ($r = -0.43$; $r = -0.45$) y el CPV e ICP ($r = -0.59$; $r = -0.57$) en los ambientes de AP y BP, indican que el P se utilizó, en mayor grado, para la producción de materia seca del vástago a expensas de la producción de grano (Cuadro 4). Asimismo, las condiciones de reducida disponibilidad de P en el suelo promovieron, en la mayoría de las localidades, un enriquecimiento del contenido de P en el vástago, acompañado de una reducción de la concentración de P en la semilla. Diversos factores ambientales y alteraciones del patrón de movilización de P del tejido senescente hacia la semilla pueden afectar la EUP en los cultivos (Richardson *et al.*, 2011).

Otro componente importante de la EUP es la eficiencia en la adquisición de P. En condiciones de severa deficiencia de P como la que prevalece en los suelos Andisoles, la mayor absorción de P y una mayor concentración de P en la planta es favorable para incrementar la formación de la semilla (Cuadro 4). La eficiencia de la producción de materia seca del vástago por unidad de P absorbido fue

mayor en los genotipos estables Paso del Muerto-2 [113], DP × Tromba [127], HV-313 × DEM [135], Cruz Gorda [140], CCHEDÉ [199], Macho II-04 [230] y el criollo [242], cultivados en Erongarícuaro (ERB) y Charahuén (CHB) (Cuadro 2) en la dosis de BP. Dicha respuesta se relaciona, entre otros factores, con la habilidad de las raíces para absorber el P del suelo (Veneklas *et al.*, 2012). En condiciones de severa deficiencia de P, como la prevaleciente en los suelos ácidos de esta región, las diferencias genotípicas en eficiencia al aprovechamiento de P se han asociado con un mayor crecimiento de la raíz, cambios en su arquitectura e incremento en la longitud de pelos radicales que favorecen la absorción de P en la superficie del suelo y el crecimiento durante la etapa vegetativa (Bayuelo-Jiménez *et al.*, 2011) y reproductiva (Flores-Torres *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

Los componentes de EUP y EAP fueron factores que explicaron la variación en la EUP en ambos niveles de P. La mayor EUP de los genotipos cultivados en Pichátaro y Charapan se relacionó con una mayor EUP, expresada en una mejor distribución de la materia seca en la planta (alto IC) y una mayor movilización de P a la semilla (alto ICP). En los ambientes de reducida disponibilidad de P de Erongarícuaro y Charahuén, la variación en la EUP se explicó por los cambios en la EAP. Los genotipos de mayor EUP y mayor estabilidad en ambientes de reducida disponibilidad de P (BP) fueron Santa Clara [115], DP × Tromba [127], Macho-I-04 [234] y el criollo de la región [242]. Entre ambientes, Erongarícuaro y Charahuén mostraron la menor IGA y podrían ser las mejores localidades para discriminar genotipos con mayor EUP en suelos con deficiencia de fósforo. El modelo AMMI mostró ser una técnica efectiva para describir el patrón de comportamiento de la interacción genotipo por ambiente y la estabilidad de las variedades a través de ambientes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a FOMIX-Gobierno del estado de Michoacán MICH-2012 No. 197142/2013-2016 y a la Coordinación de Investigación Científica, UMSNH 6.11.

BIBLIOGRAFÍA

- 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. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:1469-1480.
- Bayuelo-Jiménez J. S., M. Gallardo-Valdéz, V. A. Pérez-Decelis, L. Magdaleno-Armas, I. Ochoa and J. P. Lynch (2011) Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the P'urhépecha Plateau under contrasting phosphorus availability. *Field Crops Research* 121:350-362.

- Bayuelo-Jiménez J. S. and I. Ochoa-Cadavid (2014) Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency among maize landraces from the central Mexican highlands. *Field Crops Research* 156:123-134.
- Dia M. and T. C. Wehner (2015) G × E_SAS_PROG 1. Program for analysis of Genotype × Environment data using SAS. Cucurbit Breeding at NC State. Raleigh, N.C. <http://cuke.hort.ncsu.edu/cucurbit/wehner/software/sasgxe/GxeSas14Prg.sas> (January, 2017).
- Farshadfar E. (2008) Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 11:1791-1796.
- Flores-Torres E., I. Ochoa-Cadavid, R. E. Preciado-Ortiz y J. S. Bayuelo-Jiménez (2016) Variabilidad genotípica en maíz nativo para eficiencia y respuesta a fósforo en etapa de floración. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:339-347.
- Hay R. K. M. (1995) Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology* 126:197-216.
- Manschadi A. M., K. H. P. Kaul, J. Vollmann, J. Eitzinger and W. Wenzel (2014) Developing phosphorus-efficient crops varieties - An interdisciplinary research framework. *Field Crops Research* 162:87-98.
- Manske G. G. B., J. I. Ortíz-Monasterio, M. van Ginkel., R. M. González, R. A. Fischer, S. Rajaram and P. L. G. Vlek (2001) Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *European Journal of Agronomy* 14:261-274.
- Martínez-Sánchez J., N. Espinoza P. y Y. Villegas A. (2016) Interacción genotipo-ambiente en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 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 Resources and Crop Evolution* 54:309-325.
- Muñoz O. A. (2003) Descifrando la diversidad del maíz en los nichos ecológicos de México. In: Centli Maíz. Prehistoria e Historia, Diversidad, Potencial, Origen Genético y Geográfico. A. Muñoz O. (ed.). Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. pp:132-143.
- Murphy J. and J. P. Riley (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27:31-36.
- Newton A. C., T. Akar, J. P. Baresel, P. J. Bebeli, E. Bettencourt, K. V. Bladenopoulos, J. H. Czembor, D. A. Fasoula, A. Katsiotis, K. Koutis, M. Koutsika-Sotiriou, G. Kovacs, H. Larsson, M. A. A. Pinheiro de Carvalho, D. Rubiales, J. Russell, T. M. M. Dos Santos and M. C. Vaz Pato (2010) Cereal landraces for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30:237-269.
- Ortiz-Monasterio J. I., G. G. B. Manske and M. van Ginkel (2001) Nitrogen and phosphorus use efficiency. In: Application of Physiology in Wheat Breeding. M. P. Reynolds, J. I. Ortiz-Monasterio and A. McNab (eds.). CIMMYT. Mexico, D.F. pp:200-207.
- Purchase J. L., H. Hatting and C. S. van Deventer (2000) Genotype × environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil* 17:101-107.
- Richardson A. E., J. P. Lynch, P. R. Ryan, E. Delhaize, F. A. Smith, S. E. Smith, P. R. Harvey, M. H. Ryan, E. J. Veneklaas, H. Lambers, A. Oberson, R. A. Culvenor and R. J. Simpson (2011) Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil* 349:121-156.
- Setiyono T. D., D. T. Walkers, K. G. Cassman, C. Witt and A. Dobermann (2010) Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research* 118:158-168.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2016) Producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Cd. de México. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> (Diciembre, 2016).
- Soil Survey Staff (1999) Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2nd ed. Agriculture Handbook No. 436. Natural Resources Conservation Service. USDA. Washington, D. C. 886 p.
- Thangavel P., A. Anandan and R. Eswaran (2011) AMMI analysis to comprehend genotype-by-environment (G × E) interactions in rainfed grown mungbean (*Vigna radiata* L.). *Australian Journal of Crop Science* 5:1767-1775.
- Vargas H. M. and J. Crossa (2000) The AMMI Analysis and Graphing the Biplot. CIMMYT. México, D. F. 39 p.
- Veneklaas E. J., H. Lambers, J. Bragg, P. M. Finnegan, C. E. Lovelock, W. C. Plaxton, C. A. Price, W. R. Scheible, M. W. Shane, P. J. White and J. A. Raven (2012) Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist* 195:306-320.
- Zobel R. W., M. J. Wright and H. G. Gauch (1988) Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal* 80:388-393.