

RESPUESTAS FENOTÍPICAS DE POBLACIONES NATIVAS DE MAÍZ AZUL A EFECTOS AMBIENTALES¹

[PHENOTYPIC RESPONSES OF BLUE MAIZE POPULATIONS TO ENVIRONMENTAL EFFECTS]

Socorro Morales Flores¹, José L. Chávez-Servia^{2§}, José C. Carrillo-Rodríguez¹, Gerardo Rodríguez-Ortiz¹

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Ex-Hacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca. ²Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-IPN-Oaxaca, Hornos No. 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, Oaxaca, México, Tel/fax: (+52) 951-5170610. [§]Autor para correspondencia: (jchavez@hotmail.com).

RESUMEN

Los maíces azules representan una fuente de alimento y estrategia de vida para las comunidades rurales de Oaxaca. Con el objetivo de evaluar la interacción genotipo-ambiente y efecto del ambiente sobre poblaciones heterogéneas de maíz azul, se sembraron 70 poblaciones en Villa de Zaachila y Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán durante el ciclo primavera-verano 2013. Las poblaciones evaluadas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) a través de localidades de evaluación, también mostraron contrastes significativos y se presentaron interacciones significativas entre localidades y poblaciones evaluadas. Todo esto en relación a floración femenina de plantas, diámetro, longitud e hileras de granos en mazorca, longitud y ancho de grano, peso y volumen de 1000 granos, y rendimiento. Los componentes de varianza fenotípica, reflejaron que la varianza ambiental fue significativamente más importante que las varianzas genotípicas y de interacción genotipo-ambiente, en todos los caracteres agronómicos evaluados, excepto en número de hileras en mazorca, relación largo/ancho de grano y volumen de 1000 granos. Este efecto se reflejó en altos valores de heredabilidad en sentido amplio ($0.28 < H^2 < 0.39$). A través de los estimadores no paramétricos de estabilidad se identificaron dos grupos de poblaciones sobresalientes: unas con mayor grado de estabilidad en días a floración, peso y volumen de 1000 granos y rendimiento experimental (A-01, A-07, A-23, C-223, C-224, C-305 y C-334) y otras más estables en rendimiento (A-19, A-25, C-12, C-05, C-189 y C-313), pero no necesariamente fueron estables en días a floración masculina ni en peso y volumen de 1000 granos. Los resultados son relevantes para diseñar una estrategia de mejoramiento genético *in situ* con objetivos y metas locales comunitarias.

Palabras clave: *Zea mays*, interacción genotipo-ambiente, estabilidad no paramétrica.

ABSTRACT

Blue maize represents a source of food and is a life strategy for rural communities from Oaxaca. Then, in order to evaluate the genotype-environment interactions and environmental effect on heterogeneous populations of blue maize, 70 populations were sown in Villa de Zaachila and Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlan, during spring summer 2013 crop cycle. Significant differences ($p < 0.05$) were determined for populations, locations (environments) and genotype-

¹Recibido 10 de octubre de 2018

Aceptado 15 de diciembre de 2018

environment interaction. All this for days to female flowering, diameter, length and number of rows in the cob, weight and volume of 1000 kernels, and experimental yield. Variance components reflected that, the environmental variance was significantly higher than genotypes and genotype-environment interactions variances over all traits, except to number of rows of the cob, relation length/width of kernel, and volume of 1000 kernels. Such effect were relevant to increase the broad-sense heritability values ($0.28 < H^2 < 0.39$). Two populations groups were determined by non-parametric estimators of stability: one integrated with stable populations for days to flowering, weight and volume of 1000 kernels, and experimental yield (A-01, A-07, A-23, C-223, C-224, C-305 and C-334) and other ones also stables but only for yield (A-19, A-25, C-12, C-05, C-189 and C-313). The results are relevant to design a strategy of in situ plant breeding but with local goals and challenges.

Index words: *Zea mays*, genotype-environment interaction, non-parametric stability.

INTRODUCCIÓN

La interacción genotipo-ambiente es la diferencial de respuesta de un genotipo a través de diferentes condiciones ambientales o de cultivo. Es de enorme importancia en los programas de mejoramiento genético de maíz, entender la interacción genético-ambiental en un carácter complejo como el rendimiento de grano (Zambrano *et al.*, 2017). Los factores agroecológicos como precipitaciones, oscilaciones térmicas, características de suelo y usos de insumos o modificaciones artificiales del microambiente de producción, son determinantes en el crecimiento y desarrollo del genotipo, rendimiento producido y expresiones fenotípicas de diversos caracteres de importancia agronómica (Akcura y Kaya, 2008; Delic *et al.*, 2009; Crossa *et al.*, 2010).

Las interacciones genotipo-ambientes son fuentes importantes de variación fenotípica en todos los cultivos, y se usa el término estabilidad para definir a un genotipo con rendimiento más o menos constante, independientemente de las condiciones ambientales. Es decir, un genotipo con mínima varianza en rendimiento y otros caracteres agronómicos a través de diferentes ambientes. Aun cuando se hace referencia a un concepto estático al decir estable, biológicamente es difícil asumirse como tal y se prefiere interpretar como un concepto dinámico, debido a que el genotipo puede responder favorablemente en ambientes restrictivos o de estrés y expresar su mayor potencial en condiciones favorables (Becker y León, 1988).

Existen diversos métodos estadísticos paramétricos y no paramétricos para evaluar, estudiar e interpretar la interacción genotipo-ambiente. Entre los enfoques paramétricos se destacó el uso de parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell (1966) y en las últimas décadas los análisis AMMI (*additive main effects and multiplicative interaction*) en conjunción con el uso de componentes principales (Gauch *et al.*, 2008), y *biplot* evalúan el efectos de genotipo e interacción genotipo-ambientes (GGE), Gabriel (1971) y Yan *et al.* (2000 y 2007). No obstante, es difícil mantener el supuesto de normalidad univariante o multivariante de los errores e interacción.

El enfoque no-paramétrico o análisis de agrupamientos no requiere asumir tal aseveración específica e incrementa la facilidad de interpretación. Huehn (1979), Nassar y Huehn (1987) y Huehn (1990 a, b) proponen cuatro métodos para medir la estabilidad fenotípica no paramétrica: $S_i^{(1)}$, el rango absoluto de las diferencias del mismo genotipo a través de ambientes; $S_i^{(2)}$, varianza de diferencias de rangos a través de ambientes; $S_i^{(3)}$, suma de desviaciones respecto a la media de

rango de ambientes al cuadro; y $S_i^{(6)}$, relación entre suma de diferencias de rangos respecto a la media de rangos y rango promedio. No obstante, las diferencias y particularidades, en términos generales, existe una relación directa entre los resultados de los enfoques paramétricos y no paramétricos en el análisis de estabilidad de genotipos (Piepho y Lotito, 1992; Kilic, 2012).

El concepto de estabilidad no paramétrica es ampliamente utilizada para evaluar estabilidad del rendimiento en cultivos anuales a través de ambientes (Vargas *et al.*, 2016; Mohammadi *et al.*, 2009), interpretación de la interacción genotipo ambiente en plantas autógamias como trigo (Rodríguez *et al.*, 2002; Akcura y Kaya, 2008; Kilic, 2012) y para medir la estabilidad de genotipos en maíz (Delic *et al.*, 2009), entre otros usos. Estos estimadores no paramétricos complementan la información generada en estimaciones de componentes de varianza en modelos mixtos y heredabilidad, y en conjunto ayudan a entender, desde una perspectiva más amplia, la interacción genotipo-ambiente (Khuri, 2000; Cadena-Meneses y Castillo-Morales, 2000; Shimelis y Shiringani, 2010).

En diversos trabajos en maíz desarrollados en los estados de México como Tamaulipas, Nayarit, Tlaxcala, Puebla, Oaxaca, y Estado de México, entre otros, han realizado ensayos en diferentes localidades, y a través de un análisis de varianza combinado prueban la significancia de la interacción genotipo-localidad como un indicador de cierto grado de adaptabilidad de las poblaciones a través de ambientes. Consecuentemente, subdividen a las localidades en regiones relativamente homogéneas donde determinan que poblaciones tendrán adaptación general o adaptaciones específicas (Carabaloso-Torrecilla *et al.*, 2000; Arellano *et al.*, 2003; Antonio *et al.*, 2004; López-Romero *et al.*, 2005; Aguilar-Castillo *et al.*, 2006; González *et al.*, 2006; González *et al.*, 2008; Hortelano *et al.*, 2008; Pecina-Martínez *et al.*, 2009; Ángeles-Gaspar *et al.*, 2010; Pecina-Martínez *et al.*, 2011; Castro-Nava *et al.*, 2011).

Esas poblaciones evaluadas representaron a diferentes razas mexicanas de maíz con distribución regional, y se asume cierta adaptación específica; entre ellas Chalqueño, Cónico, Jala, Zapalote Chico, Cacahuacintle, Tuxpeño, Vandeño, Olotillo y Tepecintle, entre otras (Wellhausen *et al.*, 1951; Vielle-Calzada y Padilla, 2009). En este contexto, se planteó el objetivo de evaluar la interacción genotipo-ambiente en caracteres de rendimiento, a través de componentes de varianza y estabilidad no paramétrica, en poblaciones nativas de maíz azul de la mixteca oaxaqueña.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

La colección de maíces azules evaluados se constituyó por 66 poblaciones nativas de maíz azul colectadas en la Mixteca oaxaqueña e incluyendo, a manera de testigos externos, cuatro poblaciones de Puebla (Cuadro 1). Las poblaciones de la mixteca oaxaqueña fueron colectadas en 42 comunidades de 12 municipios dentro de una variación altitudinal de 1340 a 2900 msnm. Se incluyen municipios de la Mixteca baja dentro de los distritos de Huajuapán de León, Santiago Juxtlahuaca y Silacayoapam; y municipios de la Mixteca alta de los distritos de Tlaxiaco, Jaltepec, Nochixtlán y Coixtlahuaca.

Cuadro 1. Listado de muestras poblacionales de maíz nativo, colectadas en la Mixteca oaxaqueña.

Población	Localidad o agencia y/ cabecera municipal	Altitud (m)	Latitud	Longitud
AZUL-01	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 07"	97° 35' 14"
AZUL-02	Abasolo, Chalcatongo de Hidalgo	2580	16° 59' 17"	97° 33' 34"
AZUL-03	Reforma, Chalcatongo de Hidalgo	2640	16° 56' 47"	97° 31' 22"
AZUL-05	Aldama, Chalcatongo de Hidalgo	2240	16° 57' 43"	97° 35' 50"
AZUL-06	Chapultepec, Chalcatongo de Hidalgo	2520	16° 58' 57"	97° 34' 40"
AZUL-07	Benito Juárez, San Miguel El Grande	2200	17° 00' 17"	97° 37' 43"
AZUL-08	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
AZUL-09	Progreso, Chalcatongo de Hidalgo	2460	17° 02' 40"	97° 34' 12"
AZUL-10	Iturbide, San Miguel El Grande	2480	17° 03' 40"	97° 35' 22"
AZUL-11	Hidalgo, San Miguel El Grande	2500	17° 04' 25"	97° 35' 38"
AZUL-12	Guadalupe Victoria, San Miguel El Grande	2480	17° 04' 08"	97° 36' 37"
AZUL-13	Francisco I. Madero, San Miguel El Grande	2300	17° 02' 07"	97° 38' 12"
AZUL-14	Benito Juárez, San Esteban Atatlaha	2400	17° 02' 38"	97° 38' 50"
AZUL-15	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 38' 16"
AZUL-16	Ignacio Zaragoza, San Miguel El Grande	2500	17° 02' 02"	97° 38' 16"
AZUL-17	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
AZUL-19	San Esteban Atatlaha	2450	17° 03' 55"	97° 40' 38"
AZUL-20	El Ojite, Tlaxiaco	2500	17° 12' 41"	97° 43' 45"
AZUL-21	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
AZUL-22	Morelos, San Miguel El Grande	2620	17° 03' 40"	97° 37' 38"
AZUL-23	El Ojite, Tlaxiaco	2020	17° 12' 41"	97° 43' 45"
AZUL-24	San Esteban Atatlaha	2450	17° 03' 55"	97° 40' 38"
AZUL-25	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 02"	97° 38' 16"
AZUL-26	Cañada Morelos, Chalcatongo de Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"
AZUL-27	Cañada Morelos, Chalcatongo De Hidalgo	2360	16° 58' 30"	97° 36' 58"
AZUL-28	Vicente Guerrero, San Miguel El Grande	2500	17° 01' 40"	97° 36' 57"
AZUL-29	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45"	97° 37' 10"
AZUL-31	Guerrero Grande, San Esteban Atatlaha	2520	17° 02' 42"	97° 41' 32"
AZUL-32	San Miguel El Grande	2480	17° 02' 45"	97° 37' 10"
CIIDIR-02	Independencia, San Esteban Atatlaha	2640	17° 05' 45"	97° 39' 35"
CIIDIR-05	Tlaxiaco	2500	17° 16' 10"	97° 40' 45"
CIIDIR-12	San Juan Ñumi	2080	17° 21' 27"	97° 42' 38"
CIIDIR-54	Santa María del Rosario	2320	17° 21' 00"	97° 35' 59"
CIIDIR-66	San Martín Hualmelulpam	2210	17° 24' 07"	97° 36' 58"
CIIDIR-107	Abasolo, Chalcatongo de Hidalgo	2580	16° 59' 22"	97° 33' 32"
CIIDIR-112	Chalcatongo de Hidalgo	2500	17° 01' 45"	97° 34' 10"
CIIDIR-125	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 10"	97° 35' 15"
CIIDIR-129	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 10"	97° 35' 15"
CIIDIR-131	Independencia, Chalcatongo de Hidalgo	2440	17° 02' 10"	97° 35' 15"
CIIDIR-145	Hidalgo, San Miguel el Grande	2500	17° 02' 10"	97° 35' 39"
CIIDIR-163	Ignacio Zaragoza, San Miguel el Grande	2500	17° 02' 02"	97° 38' 16"
CIIDIR-167	Ignacio Zaragoza San Miguel el Grande	2500	17° 02' 02"	97° 38' 16"
CIIDIR-169	Yucuiji, San Esteban Atatlaha	2900	17° 02' 10"	97° 41' 27"
CIIDIR-172	Independencia, San Esteban Atatlaha	2640	17° 05' 45"	97° 39' 35"
CIIDIR-179	Morelos, San Miguel El Grande	2825	17° 03' 55"	97° 40' 38"
CIIDIR-184	La Loma, Santa Cruz Nundaco	2300	17° 02' 10"	97° 43' 25"
CIIDIR-185	Ojo de agua, Santa Cruz Nundaco	2680	17° 08' 06"	97° 42' 33"
CIIDIR-189	Yucuiji, San Esteban Atatlaha	2900	17° 02' 10"	97° 41' 27"
CIIDIR-190	Yucuiji, San Esteban Atatlaha	2900	17° 02' 10"	97° 41' 27"
CIIDIR-197	Ignacio Zaragoza, San Miguel el Grande	2500	17° 02' 02"	97° 38' 16"
CIIDIR-216	Santa Inés de Zaragoza, Nochixtlán	1750	17° 13' 41"	97° 09' 30"
CIIDIR-223	San Francisco Jaltepec	2070	17° 23' 04"	97° 15' 43"
CIIDIR-224	Santiago Tilantongo, Nochixtlán	2220	17° 17' 00"	97° 20' 20"
CIIDIR-231	El Palmar San Miguel Huautla, Nochixtlán	1970	17° 44' 25"	97° 08' 35"
CIIDIR-233	Santiago Apoala, Nochixtlán	1970	17° 38' 50"	97° 08' 10"
CIIDIR-267	Santa María Nativitas, Coixtlahuaca	2180	17° 39' 40"	97° 20' 00"
CIIDIR-283	Santiago Cacaloxtpec, Huajuapam	1760	17° 43' 15"	97° 44' 30"
CIIDIR-305	San Sebastián del Monte, Santo Domingo Tonalá	1680	17° 40' 40"	98° 01' 19"
CIIDIR-313	San Simón Zahuatlán, Huajuapam	1920	17° 49' 40"	98° 00' 14"
CIIDIR-334	San Mateo Nejapan, Silacayoapam	1340	17° 29' 48"	98° 04' 19"
CIIDIR-337	San Andrés Tepetlapa, Silacayoapam	1460	17° 39' 54"	98° 23' 27"
CIIDIR-339	San Miguel Ahuehuetitlán, Silacayoapam	1370	17° 40' 14"	98° 19' 17"
CIIDIR-363	Nican de la Soledad Santiago, Juxtlahuaca	2000	17° 17' 19"	98° 02' 09"
CIIDIR-369	Natividad, Santo Domingo Tonalá, Huajuapam	1360	17° 41' 28"	97° 58' 06"
HUA-09	San Martín Hualmelulpam	2210	17° 24' 07"	97° 36' 58"
CIIDIR-372	Chalcatongo de Hidalgo	2500	17° 01' 45"	97° 34' 10"
CPUE-339				
CPUE-636				
CPUE-637				
CPUE-651				

Ambientes de evaluación y manejo de experimentos

La colección de maíces nativos fue sembrada en el ciclo primavera-verano de 2013 en localidades contrastantes agroecológicamente (Cuadro 2). La primera siembra se hizo el 11 de mayo de 2013 en Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán en la región Mixteca oaxaqueña, y la segunda se estableció el 5 de junio de 2013 en terrenos de la cabecera municipal de Villa de Zaachila, región de los Valles Centrales de Oaxaca. En ambos casos la siembra se hizo bajo condiciones de temporal, en un diseño de bloques al azar con 3 y 5 repeticiones, en la primera y segunda localidad, respectivamente.

Cuadro 2. Características eco-geográficas de los ambientes de evaluación en Villa de Zaachila (cabecera municipal) y Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán.

Descriptor ecogeográfico	Villa de Zaachila	Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán
Longitud oeste (LO)	96° 43' 37.54"	97° 22' 08.92"
Latitud norte (LN)	16° 56' 06.68"	17° 33' 01.53"
Altitud (m)	1509	2380
Temperatura máxima (°C)	27.39	24.05
Temperatura mínima (°C)	11.09	8.21
Temperatura media (°C)	18.89	15.60
Precipitación media anual (mm)	552.4	651
Humedad relativa (%)	67.97	66.79
Suelos frecuentes (clasificación FAO/UNESCO)	Luvisol y vertisol	Litosoles, regosoles y cambisoles
Pendiente frecuentes	0.5 a 5%	10 a 40%
Periodo de heladas	-----	Diciembre-febrero
Clima	Semicálido húmedo con lluvias en verano ACw	Templado subhúmedo con lluvias en verano C(w),

Se aplicó la fórmula de fertilización 120-100-60 de N-P-K, el nitrógeno se dividió en dos aplicaciones; 50% a la primera escarda y 50% cercano a la floración en aparición de la hoja bandera. El control de maleza e insectos se hizo según las recomendaciones para maíz en cada ambiente.

Para evaluar la respuesta de las poblaciones a los ambientes de evaluación, se utilizaron las variables: días a floración femenina, longitud y diámetro de mazorca, número de hileras y granos por hilera en mazorca, longitud y ancho de grano, peso de 1000 granos y volumen de 1000 granos. Además, mediante el peso de mazorcas a la cosecha, se estimó el rendimiento experimental ajustado por número de plantas, humedad al 14%, proporción de grano y unidad de área evaluada (8 m²). Complementariamente, por unidad experimental, a la cosecha se estimó el porcentaje de mazorcas sanas, enfermas de acuerdo con la guía de campo de pudriciones de la mazorca (CIMMIT, 2004) y dañadas por plagas (daños físicos al grano), respecto al total de mazorcas cosechadas. En estado de madurez fisiológica de grano se hizo una estimación visual del porcentaje de acame de raíz y tallo por parcela experimental.

Análisis estadístico

Con los datos agronómicos se hicieron análisis de varianzas combinados mediante el diseño de bloques completos al azar; donde poblaciones fueron consideradas como efectos fijos, localidades (ambientes) como efectos aleatorios y repeticiones anidadas en ambientes. Después, se estimaron los componentes de varianza por el método de máxima verosimilitud restringida (REML) mediante el procedimiento VARCOMP del paquete estadístico SAS (2000). A partir de los valores de varianzas (σ^2), se calculó la heredabilidad en sentido amplio (H^2) mediante la expresión $H^2 = \sigma^2_{\text{poblaciones}} / (\sigma^2_{\text{localidades}} + \sigma^2_{\text{colectas}} + \sigma^2_{\text{localidades*poblaciones}} + \sigma^2_{\text{rep(localidades)}} + \sigma^2_{\text{error}}$, donde los subíndices indican los efectos.

Para determinar la estabilidad en los materiales se utilizaron los índices propuestos por Huehn (1990) y Nassar y Huehn (1987), los que combinan la media de la expresión fenotípica de rendimiento y caracteres asociados y su estabilidad a través de localidades de evaluación. Tienen como base la asignación de rangos al valor de la variable evaluada en cada población; donde el rango 1 fue asignado a la población con el valor más bajo, rango 2 a la población con el segundo valor más bajo y así sucesivamente, en cada ambiente o localidad de evaluación. También se estimó un rango promedio de cada población a través de ambientes. Los parámetros de estabilidad no paramétrica de Huehn (1990) y Nassar y Huehn (1987), se estimaron mediante las expresiones siguientes:

$S_i^{(1)} = \frac{2}{m(m-1)} \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m |r_{ij} - \hat{r}_{ij}|$, la media de la diferencia absoluta de rangos de un genotipo a través de ambientes ($r_{ij} \neq \hat{r}_{ij}$, ambientes diferentes).

$S_i^{(2)} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{j=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_{ij})^2$, varianza entre rangos a través de ambientes.

$S_i^{(3)} = \sum_{j=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_{i.})^2 / \bar{r}_{i.}$, suma de las desviaciones al cuadrado de cada genotipo respecto al rango promedio.

$S_i^{(6)} = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - \bar{r}_{i.}| / \bar{r}_{i.}$, suma de cuadrados de rangos absolutos de cada población respecto al rango promedio.

Donde, i = poblaciones (1, 2, ..., 70), m = número de ambientes (=localidades) de evaluación ($j = 1, 2$), r_{ij} = rango del i -ésima población en el j -ésimo ambiente y $\bar{r}_{i.}$ = media del rango del i -ésima población a través de ambientes. Así, para las variables días a floración femenina, peso y volumen de 1000 granos se estimaron los índices $S_i^{(1)}$ y $S_i^{(2)}$, y para rendimiento experimental se calcularon los índices $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, $S_i^{(3)}$ y $S_i^{(6)}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los análisis de varianzas combinados se determinaron diferencias altamente significativas ($p < 0.05$) entre localidades y poblaciones para todos los caracteres evaluados. En el caso de la interacción poblaciones-localidades no hubo diferencias significativas en porcentaje de mazorcas sanas y enfermas (pudriciones) y porcentaje de acame. Esto último indica que, la presencia de daños por enfermedades y acame dependen de la localidad de evaluación. En estos ensayos, el rendimiento experimental presentó diferencias significativas en la interacción poblaciones-

localidades (Cuadro 3). Todo indica una alta variabilidad en rendimiento y caracteres asociados entre las poblaciones evaluadas e interaccionan frecuentemente con el ambiente de evaluación.

Cuadro 3. Significancias de cuadrados medios de variables agronómicas evaluadas en 70 poblaciones de maíz azul, en Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán y Villa de Zaachila, primavera-verano 2013.

Caracteres evaluados	Localidades (A)	Repetición/ Localidad	Poblaciones (G)	G × A	Error	C.V. (%)
Días a floración femenina	220016.57**	55.89**	180.52**	49.90**	18.14	4.7
Longitud de mazorca	1090.17**	61.94**	49.83**	14.03**	4.06	15.7
Diámetro de mazorca	104.53**	1.48**	3.11**	0.81**	0.16	9.6
Núm. hileras en mazorca	85.24**	2.58 ^{NS}	66.00**	6.03**	2.95	14.1
Ancho de grano	16.83**	1.38**	7.81**	0.92**	0.54	8.5
Longitud de grano	261.99**	2.56*	4.11**	2.22**	1.15	8.9
Peso de mil granos	873819.2**	919.8 ^{NS}	26161.8**	4498.2**	2380.0	16.0
Volumen de mil granos	1345751.6**	3007.4 ^{NS}	52457.1**	6147.2**	4103.0	15.5
% mazorcas sanas	0.205**	0.007 ^{NS}	0.017**	0.009 ^{NS}	0.008	9.7
% mazorcas enfermas	0.129*	0.076*	0.045**	0.025 ^{NS}	0.027	24.9
% mazorcas dañadas	0.295**	0.011 ^{NS}	0.0363**	0.034*	0.022	21.6
% de acame	12.946**	0.276**	0.1002**	0.059 ^{NS}	0.048	26.9
Rendimiento experimental	6416.69**	390.20**	258.26**	173.26*	118.90	23.4

^{NS}No significativo ($p > 0.05$); *significativo a $p < 0.05$; **significativo a $p < 0.01$; CV= coeficiente de variación.

En general, en la comunidad de Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán los valores promedios de cada variable presentaron un alta expresión fenotípica y difieren significativamente de los valores obtenidos en Zaachila, excepto en porcentaje de plantas enfermas y acame donde se presentó mayor incidencia en esta comunidad (Cuadro 4).

Los resultados reflejan el efecto contrastante entre ambientes de evaluación; el primero en un clima templado subhúmedo y el segundo semicálido húmedo, pero ayudan a discriminar genotipos cuando las condiciones son restrictivas. Estos efectos son frecuentes en evaluaciones de maíces de zonas templadas y evaluados en ambientes contrastantes; un ejemplo de esto lo reporta Pecina *et al.* (2011) en la evaluación de poblaciones de maíz de Tamaulipas, y el patrón también se repite en las evaluaciones realizadas por Arellano *et al.* (2003) y Antonio *et al.* (2004) con maíz azul en los Valles Altos de México.

Cuadro 4. Comparación de medias entre ambientes de evaluación en relación al comportamiento agronómico de 70 poblaciones de maíz azul, primavera-verano 2013.

Caracteres evaluados	Villa de Zaachila	Tooxi, Sto. Domingo Yanhuitlán
Días a floración femenina	75.7 b [†]	116.7 a
Longitud de mazorca (cm)	11.9 b	13.3 a
Diámetro de mazorca (cm)	3.9 b	4.3 a
Núm. hileras en la mazorca	11.6 b	12.5 a
Ancho de grano (mm)	8.5 b	8.7 a
Longitud de grano (mm)	11.3 b	12.8 a
Peso de mil granos (g)	262.9 b	346.8 a
Volumen de mil granos (cm ³)	362.8 b	464.9 a
Porcentaje de mazorcas sanas	0.94 b	0.98 a

Porcentaje de mazorcas enfermas	0.67 a	0.65 b
Porcentaje de mazorcas con daños de plagas	0.71 b	0.67 a
Porcentaje de acame	0.93 a	0.61 b
Rendimiento (kg/ 8 m ²)	42.5 b	50.8 a

†en renglón, medias con letras iguales no difieren significativamente (Tukey, $p < 0.05$)

En este trabajo se evaluó la incidencia de mazorcas con pudriciones ocasionadas por *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp., *Diplodia* sp., y *Cladosporium* sp., principalmente (CIMMYT, 2004). En cuanto a incidencia de plagas en la mazorca, se evaluó el daño por pájaros, *Sitophilus zeamais* M., y resultados de la incidencia en elote de *Heliothis* spp. (Ortega, 1987). En ambos casos, los resultados fueron diferentes entre localidades de evaluación y entre poblaciones evaluadas (Cuadro 5). La alta incidencia de mazorcas enfermas en Yanhuatlán y Zaachila, indican que el agricultor no ha seleccionado eficientemente para contrarrestar los efectos de las pudriciones en la mazorca y que las enfermedades persisten en los campos de cultivo de los agricultores como parte de una co-evolución enfermedades-maíz. Un patrón general fue que, las poblaciones originarias de mayores altitudes (> 2600 msnm), provenientes de los municipios de San Miguel El Grande y San Esteban Atlatluca, y de bajas altitudes (< 1500 msnm) de Huajuapán de León, Silacayoapan y Santiago Juxtlahuaca, mostraron mayores incidencias de pudriciones en la mazorca.

No obstante, los daños por plagas también fueron considerables e indican que las mazorcas no se encuentran completamente cubiertas por las brácteas envolventes y ponen al descubierto el elote y posteriormente la mazorca madura fisiológicamente, y hace que se incremente la incidencia de plagas en los lotes de cultivo. Todo se puede corregir con un programa de mejoramiento *in situ* a largo plazo, como se ha demostrado en otros trabajos (Smith *et al.*, 2001).

En ambas localidades de evaluación, el daño por acame de raíz y tallo fue alto, se mostró mayor incidencia en Villa de Zaachila que en Tooxi, Santo Domingo Yanhuatlán (Cuadro 5). No obstante, la poblaciones C-216, C-231, C-313 y C-339 fue las menos afectada por acame. Todo esto hace pensar que, aun cuando existen diversos problemas fitosanitarios, de plagas y de comportamiento agronómico, existe variabilidad genética suficiente para superar estos inconvenientes.

Cuadro 5. Incidencia de daños por enfermedades y plagas en mazorca, y porcentaje de acame en poblaciones de maíz azul, en dos ambientes contrastantes.

Colectas	Tooxi, Santo Domingo Yanhuatlán				Villa de Zaachila			
	% Sanas	% Enfermas	% Dañadas	% Acame	% Sanas	% Enfermas	% Dañadas	% Acame
A-01	64.6	4.8	30.6	21.1	19.1	14.2	6.7	77.9
A-02	51.3	2.6	46.2	35.7	19.1	14.2	6.7	77.9
A-05	71.6	10.7	17.7	20.6	24.6	8.6	6.9	80.7
A-06	49.8	0.0	16.9	17.0	19.1	15.1	5.9	83.4
A-07	85.6	6.7	7.7	15.1	70.1	10.1	19.8	53.4
A-08	89.6	5.0	5.4	5.4	13.3	3.3	3.3	79.2
A-09	65.8	7.9	26.4	23.6	48.5	30.0	21.5	54.6
A-11	48.5	3.0	15.2	16.7	-	-	-	73.0
A-12	68.5	3.9	27.6	18.8	56.2	19.2	24.7	63.9
A-13	75.0	11.8	13.3	7.9	33.9	6.6	19.5	67.1
A-14	69.6	6.7	23.8	21.3	48.8	16.0	15.2	75.2
A-15	32.4	0.0	1.0	6.7	25.0	0.0	0.0	98.6
A-16	56.4	8.7	34.9	58.0	15.0	5.0	20.0	81.9
A-17	72.2	6.2	21.6	36.4	14.3	5.7	0.0	79.0
A-19	81.9	8.5	9.7	13.6	37.7	15.3	7.0	85.0
A-20	76.6	9.5	13.9	9.4	10.0	0.0	10.0	68.3
A-22	70.4	8.1	21.5	29.4	20.0	0.0	0.0	100.0

A-23	78.0	7.2	14.8	13.5	66.1	8.6	25.3	33.2
A-24	71.6	7.6	20.8	12.6	67.2	5.6	27.2	71.8
A-25	62.1	5.0	32.9	39.8	66.0	1.4	32.6	85.3
A-26	68.2	9.3	22.6	9.5	13.3	2.2	4.4	81.1
A-28	50.0	25.2	24.8	14.9	58.9	26.0	15.1	51.8
A-29	58.0	12.3	29.7	28.4	29.3	12.4	18.3	38.7
A-31	76.4	7.5	16.2	17.1	53.8	10.6	15.6	100.0
A-32	59.2	26.8	14.0	12.0	45.8	20.2	14.0	74.3
A-27	69.2	6.9	23.9	24.0	43.7	11.4	24.9	100.0
C-12	70.4	10.3	19.3	12.7	62.4	16.1	21.6	51.8
C-02	71.2	19.6	9.2	11.3	21.4	0.0	18.6	68.5
C-05	61.4	9.4	29.1	7.7	64.9	15.8	19.3	47.4
C-54	65.5	4.0	30.6	32.4	59.8	10.2	10.0	53.0
C-66	66.1	6.8	27.1	8.4	46.5	24.0	9.5	74.5
C-107	32.0	7.3	60.6	16.2	28.6	16.7	14.7	53.5
C-112	44.4	11.4	44.2	19.5	18.9	32.9	8.2	56.9
C-125	57.3	12.5	30.3	7.5	24.7	16.0	19.3	69.9
C-129	72.8	5.1	22.1	22.7	40.3	5.0	14.7	62.4
C-131	42.2	16.7	7.8	15.6	57.2	15.1	27.7	51.0
C-145	80.6	8.9	10.6	43.9	37.1	22.4	20.6	67.6
C-163	53.2	6.7	40.1	28.8	30.7	26.0	3.3	90.0
C-167	41.8	23.1	35.1	22.3	49.6	3.6	26.8	59.3
C-172	59.7	18.9	21.4	8.6	22.4	10.9	6.7	60.8
C-179	72.0	7.1	20.9	19.5	43.1	26.6	10.3	61.5
C-184	69.8	9.4	20.8	7.9	62.5	0.0	0.0	49.4
C-185	63.2	17.9	18.9	12.4	15.7	6.2	18.1	70.9
C-189	82.0	9.4	8.6	10.7	25.9	8.6	5.5	68.2
C-197	49.4	5.0	45.7	11.8	18.9	6.9	14.2	59.7
C-216	72.7	3.1	24.2	13.4	45.1	4.0	11.0	20.0
C-223	65.5	21.7	12.8	4.9	70.3	13.3	16.4	35.3
C-224	65.0	23.7	11.3	6.8	62.6	12.0	25.5	52.3
C-231	73.8	8.0	18.2	7.4	57.9	12.4	29.8	7.7
C-233	57.1	2.9	6.7	9.6	66.8	10.1	23.1	30.9
C-267	65.7	10.2	24.2	17.8	54.9	22.6	22.5	53.6
C-283	62.5	17.5	19.9	18.3	68.1	13.2	18.7	29.4
C-305	62.8	24.3	12.9	2.9	57.4	16.4	26.2	50.2
C-313	59.8	16.8	23.4	5.6	70.3	14.4	15.4	22.6
C-334	68.1	12.2	19.6	30.0	60.9	14.2	24.9	37.9
C-337	72.7	19.0	8.3	15.1	83.0	4.7	12.3	23.4
C-339	64.1	18.3	17.6	17.1	57.8	11.3	30.9	14.9
C-363	47.4	24.5	28.2	9.6	33.0	4.3	22.7	42.6
C-369	63.1	9.6	27.3	8.6	51.7	21.7	6.6	52.2
C-372	64.2	16.6	19.2	24.0	5.7	2.9	11.4	94.3
C-HUA09	92.8	3.2	4.0	8.9	67.3	16.7	16.0	82.9
PUE-636	67.6	17.1	15.3	15.1	17.0	0.0	23.0	88.5
PUE-637	69.9	22.1	8.0	21.0	10.0	6.7	3.3	88.0
PUE-651	70.2	16.1	13.8	19.3	61.4	19.6	19.0	60.5

En el Cuadro 6, se presentan los componentes de varianza fenotípica determinada por los efectos del ambiente, genotípico e interacción genotipo ambiente. En la circunstancia prevista por el diseño del trabajo, la evaluación de poblaciones en ambientes contrastantes, se reflejó en la varianza ambiental estimada. Esto es, la contribución de la varianza ambiental, a la estimación de la varianza fenotípica total, fue significativamente importante en todos los caracteres agronómicos evaluados, excepto en número de hileras en mazorca, relación largo/ancho de grano y volumen de 1000 granos.

Este patrón de respuesta fue semejante a la cuantificada en diversos trabajos con poblaciones nativas de maíz de las zonas templadas a frías de Puebla (Hortelano *et al.*, 2008; Ángeles-Gaspar *et al.*, 2010), estado de México (Arellano *et al.*, 2003; González *et al.*, 2006) y Tamaulipas (Pecina *et al.*, 2011), entre otros. Todo esto hizo que mediante la estimación por máxima verosimilitud restringida (REML), no se determinaran diferencias significativas en la interacción localidades-poblaciones (=genotipo \times ambiente), ya que los valores de la varianza de la

interacción son pequeños en relación con la varianza debía al error. En el caso de la varianza genotípica (poblaciones) fue significativamente mayor que la debida al error, y en volumen de 1000 granos, largo/ancho de grano y número de hileras en la mazorca, fueron mayores que la varianza ambiental, e indica una alta determinación genética.

Los valores de heredabilidad en sentido amplio (H^2), fueron bajos ($0.01 < H^2 < 0.17$) en caracteres de floración, tamaño de mazorca y rendimiento, e intermedios ($0.28 < H^2 < 0.39$) en número de granos por hilera de mazorca, relación largo/ancho de grano, peso y volumen de 1000 granos (Cuadro 5). Estos resultados coinciden con Luna-Ortega *et al.* (2013) y Gonzales *et al.* (2008). Los valores de heredabilidad bajos corresponden a caracteres complejos como rendimiento y cuantitativos como la variable fisiológica días a floración y caracteres de mazorca. Estos caracteres son foco de atención en todo programa de mejoramiento de maíz a corto, mediano y largo plazo, y requieren tiempo para incorporarse a las nuevas variedades mediante los esquemas genotécnicos convencionales de mejoramiento.

No obstante, también puede mejorarse localmente las poblaciones nativas de maíz por mejoramiento participativo o bien, en el otro extremo, identificarse poblaciones o individuos que poseen caracteres deseables mediante el uso de herramientas moleculares, y a partir de ello incorporar el carácter a la población o poblaciones objeto del mejoramiento.

Cuadro 6. Componentes de varianza y heredabilidad en sentido amplio (H^2), en rendimiento y caracteres asociados.

Variables evaluadas	Componentes de varianza					H^2
	Localidades (A)	Rep./ Loc.	Poblaciones (G)	G × A	Error	
Días a floración femenina	838.938	0.538	16.245	7.374	18.419	0.02
Longitud de mazorca	1.225	0.184	1.142	0.487	3.995	0.16
Diámetro de mazorca	0.109	0.005	0.058	0.033	0.165	0.16
Núm. de hileras en mazorca	0.073	0.0	1.280	0.134	2.953	0.29
Relación largo/ancho de grano	0.008	0.0	0.015	0.004	0.021	0.30
Peso de 1000 granos	4682.400	0.0	3424.90	769.82	2342.40	0.31
Volumen de 1000 granos	7061.600	0.0	7234.70	735.31	4111.30	0.38
Rendimiento kg/ 8 m ²	34.067	4.903	15.29	16.20	119.45	0.08

Durante la evaluación de las poblaciones de maíz azul, en ambos ambientes, se detectaron poblaciones con desadaptaciones fuertes o con daños severos por plagas, enfermedades y acame, y no se obtuvo información agronómica. Estas poblaciones fueron: PUE-339 de Puebla, A-03 de Chalcatongo de Hidalgo, A-10 y A-21 de San Miguel El Grande, C-169 y C-190 de San Esteban Atlatlahuca, Oaxaca. En la evaluación realizada en Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán la floración femenina vario desde 106 a 140 días, detectándose dos grupos extremos; precoces para el sitio de 106 a 110 días y los tardíos de 120 a 140 días. Un comportamiento contrastante presentaron las poblaciones en Villa de Zaachila; los denominados precoces variaron de 70 a 74 días y los tardíos de 82 a 87 días. No obstante, los materiales precoces y tardíos mantuvieron el mismo patrón en ambos sitios (Cuadro 7). Los caracteres peso y volumen de 1000 granos están relacionados con la densidad y tamaño de grano. En este sentido las poblaciones sobresalientes en ambos ambientes fueron PUE-637, C-224 de Nochixtlán, C-313 y C-369 de Huajuapán de León, y C-334, C-337 y C-339 de Silacayoapan, estas últimas provenientes de comunidades con altitudes de menos de 1500 msnm, y corresponde a maíz azul de grano ancho.

Cuadro 7. Comportamiento de poblaciones de maíz azul a través de ambientes, con base en floración femenina (FF), peso (PMG) y volumen de mil granos (VMG), y rendimiento (Rend., kg/ 8 m²).

Colecta	Tooxi, Santo Domingo Yanhuitlán				Villa de Zaachila			
	FF	PMG	VMG	Rend.	FF	PMG	VMG	Rend.
A-01	116.3	351.7	460.0	2.5	75.4	237.5	325.5	1.1
A-02	106.0	200.0	288.3	4.7	69.8	250.0	332.5	3.8
A-05	115.7	388.3	488.3	2.2	75.8	165.0	235.0	1.4
A-06	139.3	328.3	446.7	1.7	85.5	160.0	237.5	0.7
A-07	125.3	338.3	441.7	2.3	76.2	230.0	313.0	2.3
A-08	119.0	280.0	408.3	2.4	78.4	160.0	260.0	1.7
A-09	112.3	300.0	398.3	1.8	73.2	178.6	264.0	1.9
A-11	117.7	332.5	417.5	5.8	77.2	200.0	300.0	2.7
A-12	110.3	286.7	418.3	2.9	74.6	237.0	334.0	3.6
A-13	122.7	378.3	486.7	2.5	78.6	260.0	331.7	0.7
A-14	116.0	360.0	466.7	3.9	76.6	196.7	301.7	1.2
A-15	113.0	318.3	420.0	2.4	75.2	220.0	310.0	1.5
A-16	106.3	253.3	346.7	3.6	73.0	146.7	250.0	1.3
A-17	112.3	276.7	405.0	3.0	75.0	210.0	300.0	1.4
A-19	117.3	366.7	480.0	2.2	76.8	186.7	281.7	2.2
A-20	118.0	386.7	478.3	2.5	76.4	240.0	225.0	1.9
A-22	111.0	273.3	391.7	2.6	74.0	200.0	340.0	3.1
A-23	116.3	331.7	421.7	2.8	74.8	235.0	313.8	1.7
A-24	115.0	343.3	445.0	3.4	75.6	217.0	294.4	1.6
A-25	109.3	320.0	436.7	3.3	73.0	177.5	232.5	2.0
A-26	116.0	330.0	450.0	2.2	75.4	200.0	280.0	3.9
A-28	107.3	360.0	475.0	5.3	73.2	206.0	322.0	2.3
A-29	108.7	310.0	416.7	0.8	72.4	225.0	315.0	1.5
A-31	117.3	286.7	385.0	3.3	75.8	212.0	274.0	2.2
A-32	114.0	345.0	445.0	3.1	75.0	218.7	296.7	1.5
A-27	108.3	323.3	451.7	3.9	73.6	183.8	292.5	1.5
C-12	124.3	310.0	421.7	2.0	82.4	222.0	300.0	1.9
C-02	117.0	373.3	475.0	2.8	78.0	230.0	357.5	2.0
C-05	135.3	310.0	428.3	2.5	82.0	228.0	328.0	1.3
C-54	134.0	336.7	458.3	2.1	78.6	300.0	425.0	1.1
C-66	118.7	325.0	428.3	2.6	78.2	293.0	396.8	1.5
C-107	107.7	288.3	348.3	2.3	72.8	226.7	274.3	1.5
C-112	109.0	253.3	316.7	2.7	72.2	210.0	270.0	1.2
C-125	108.3	311.7	431.7	2.1	73.4	160.0	225.0	2.5
C-129	120.7	288.3	391.7	3.0	75.6	195.0	287.5	3.5
C-131	109.7	356.7	446.7	4.9	72.2	240.0	333.0	2.5
C-145	112.7	280.0	398.3	6.4	72.4	183.3	286.7	1.3
C-163	106.0	260.0	386.7	4.0	72.8	217.3	324.3	2.0
C-167	111.3	356.7	446.7	5.1	73.4	347.0	477.0	2.2
C-172	117.7	360.0	463.3	2.8	78.2	215.0	245.0	2.1
C-179	116.3	285.0	391.7	4.3	76.4	222.5	287.5	1.9
C-184	122.0	343.3	461.7	2.2	79.6	222.0	306.0	1.4
C-185	131.3	333.3	438.3	2.4	81.0	310.0	345.0	0.8
C-189	117.3	340.0	416.7	3.5	77.8	190.0	270.0	2.3
C-197	110.3	331.7	435.0	1.7	73.6	245.0	347.5	2.7
C-216	113.0	373.3	516.7	2.3	73.2	367.5	466.3	2.9
C-223	114.3	381.7	470.0	2.5	74.8	264.0	332.0	2.0
C-224	124.0	401.7	516.7	1.7	78.2	290.4	423.0	1.3
C-231	109.0	403.3	488.3	3.7	71.6	282.0	341.0	3.1
C-233	117.7	380.0	487.5	2.5	74.0	320.0	440.0	3.7
C-267	108.3	351.7	461.7	2.4	70.6	243.0	325.0	1.7
C-283	115.3	510.0	713.3	1.8	73.6	480.0	668.0	1.9
C-305	116.7	560.0	776.7	1.4	75.6	486.0	652.0	1.5
C-313	118.0	458.3	653.3	2.6	75.2	380.0	488.0	1.5
C-334	117.3	430.0	643.3	1.7	75.4	464.0	644.0	1.8
C-337	120.0	491.7	698.3	2.2	75.6	408.0	579.0	2.0
C-339	121.0	428.3	628.3	1.3	74.4	400.0	566.0	1.9
C-363	129.7	366.7	476.7	1.7	86.4	225.0	306.3	0.9
C-369	119.0	430.0	576.7	1.8	75.6	352.5	468.8	2.4
C-372	119.3	388.3	545.0	1.6	77.6	110.0	160.0	0.7
C-HUA09	117.0	376.7	455.0	2.1	75.4	218.0	303.0	2.6
PUE-636	115.7	433.3	643.3	2.6	76.4	191.5	334.5	1.5

PUE-637	115.0	388.3	560.0	2.4	76.0	300.0	400.0	1.9
PUE-651	134.7	320.0	413.3	3.2	73.0	239.0	349.6	2.0

En relación al rendimiento de grano por parcela experimental (kg/8 m²), la variación fue alta en Tooxi, Santo Domingo Yanhuítlán, desde 0.8 a 6.4 kg/8 m² (1 a 8 ton/ha, aproximadamente) y en Villa de Zaachila desde 0.7 a 3.9 kg/8 m² (0.875 a 4.875 ton/ha, aproximadamente), con diferencias importantes entre poblaciones dentro de cada ambiente de evaluación. No obstante, la variabilidad evaluada permitió identificar a un grupo de poblaciones con rendimientos constantes altos, entre las que se destacaron: A-02 y C-129 de Chalcatongo de Hidalgo, A-11 y A-28 de San Miguel El Grande, C-189 de San Esteban Atlatlahuca, C-231 de Nochixtlán y C-337 de Silacayoapan (Cuadro 7). Estos rendimientos son comparables, aunque inferiores a los obtenidos por Arellano *et al.* (2013) en variedades de maíz azul de los Valles Altos de México, desde 7.52 a 8.16 kg/8 m². En el ciclo primavera-verano 2013 se presentó una alta variabilidad en la estación de lluvias y temperaturas, de localidad a localidad, lo que influyó tanto en la floración femenina como en el rendimiento.

De acuerdo con los índices de estabilidad no paramétrica de Huehn (Huehn, 1979; Nassar y Huehn, 1987), se lograron identificar, de manera simplificada, las poblaciones de maíz azul con mayor grado de estabilidad en días a floración, peso y volumen de 1000 granos y rendimiento experimental, entre esta fueron: A-01, A-07, A-23, C-223, C-224, C-305 y C-334. En un segundo grupo se identificaron poblaciones estables en rendimiento, entre ellas: A-19, A-25, C-12, C-05, C-189 y C-313, las que no necesariamente fueron estables en días a floración masculina ni en peso y volumen de 1000 granos. Las demás poblaciones pueden catalogarse como inestables en uno o más caracteres medidos para estabilidad fenotípica por el método no paramétrico utilizado (Cuadro 8). Es de esperarse que la inestabilidad de algunas poblaciones o su interacción con el ambiente hace que respondan favorablemente con mayor rendimiento cuando se mejoran las condiciones agroecológicas y de manejo del cultivo como se describen en el Cuadro 7 al contrastarse con el comportamiento de estabilidad en el Cuadro 8. Por ejemplo, las poblaciones A-02, A-11, A-28, A-131, A-145, C-163, C-167 y C-179 en Yanhuítlán presentaron un rendimiento de grano mayor a 4.0 kg/8 m² (5 ton/ha, aproximadamente), pero fueron inestables en rendimiento y otras características en Zaachila.

Cuadro 8. Parámetros de estabilidad no paramétrica para floración femenina (FF), peso (PMG) y volumen de mil granos (VMG) y rendimiento (Rend., kg/ 8 m²).

Colecta	Florac. femenina		Peso mil granos		Vol. mil granos		Rendimiento experimental (kg/ 8 m ²)				
	S ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	S ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	S ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	S ⁽¹⁾	S ⁽²⁾	S ⁽³⁾	S ⁽⁶⁾	Suma S's
A-01	0.5	0.1	0.5	0.1	2.0	2.0	29.0	222.5	6.8	0.89	259.2
A-02	0.5	0.1	45.0	1012.5	2.0	2.0	4.0	816.3	25.1	0.12	845.5
A-05	13.0	84.5	53.0	1404.5	33.5	561.1	1.0	992.5	30.5	0.03	1024.0
A-06	1.0	0.5	22.0	242.0	23.0	264.5	14.0	391.3	12.0	0.43	417.7
A-07	18.0	162.0	3.5	6.1	2.0	2.0	29.0	222.5	6.8	0.89	259.2
A-08	9.0	40.5	4.0	8.0	6.5	21.1	14.0	391.3	12.0	0.43	417.7
A-09	4.0	8.0	7.0	24.5	5.5	15.1	39.0	422.5	13.0	1.20	475.7
A-11	6.0	18.0	13.0	84.5	1.0	0.5	61.0	1742.5	53.6	1.88	1859.0
A-12	9.5	45.1	27.5	378.1	11.0	60.5	55.0	1262.5	38.8	1.69	1358.0
A-13	2.5	3.1	7.0	24.5	6.0	18.0	41.0	492.5	15.2	1.26	550.0
A-14	18.0	162.0	32.0	512.0	7.0	24.5	55.0	1262.5	38.8	1.69	1358.0
A-15	8.5	36.1	7.0	24.5	2.5	3.1	1.0	992.5	30.5	0.03	1024.0
A-16	9.0	40.5	0.5	0.1	1.0	0.5	47.0	762.5	23.5	1.45	834.5
A-17	9.5	45.1	14.5	105.1	2.5	3.1	35.0	312.5	9.6	1.08	358.2
A-19	8.5	36.1	38.5	741.1	17.0	144.5	31.0	242.5	7.5	0.95	282.0
A-20	1.0	0.5	14.5	105.1	35.5	630.1	10.0	531.3	16.3	0.31	557.9
A-22	5.5	15.1	12.0	72.0	15.5	120.1	43.0	572.5	17.6	1.32	634.4

A-23	8.5	36.1	9.5	45.1	4.5	10.1	18.0	291.3	9.0	0.55	318.9
A-24	12.5	78.1	11.5	66.1	4.0	8.0	43.0	572.5	17.6	1.32	634.4
A-25	1.0	0.5	15.5	120.1	19.5	190.1	31.0	242.5	7.5	0.95	282.0
A-26	2.5	3.1	10.0	50.0	13.5	91.1	63.0	1922.5	59.2	1.94	2046.6
A-28	10.5	55.1	28.0	392.0	2.5	3.1	59.0	1572.5	48.4	1.82	1681.7
A-29	3.5	6.1	14.5	105.1	8.0	32.0	55.0	1262.5	38.8	1.69	1358.0
A-31	0.0	0.0	10.5	55.1	0.0	0.0	18.0	291.3	9.0	0.55	318.9
A-32	4.5	10.1	10.5	55.1	3.0	4.5	37.0	362.5	11.2	1.14	411.8
A-27	12.0	72.0	14.0	98.0	8.0	32.0	52.0	1056.3	32.5	1.60	1142.4
C-12	6.0	18.0	11.5	66.1	1.5	1.1	27.0	212.5	6.5	0.83	246.8
C-02	16.0	128.0	15.0	112.5	2.5	3.1	1.0	992.5	30.5	0.03	1024.0
C-05	2.0	2.0	17.0	144.5	8.5	36.1	27.0	212.5	6.5	0.83	246.8
C-54	4.5	10.1	20.5	210.1	11.0	60.5	9.0	572.5	17.6	0.28	599.4
C-66	8.5	36.1	26.0	338.0	23.5	276.1	11.0	492.5	15.2	0.34	519.0
C-107	3.5	6.1	20.5	210.1	0.0	0.0	4.0	816.3	25.1	0.12	845.5
C-112	7.0	24.5	18.0	162.0	1.0	0.5	33.0	272.5	8.4	1.02	314.9
C-125	9.5	45.1	16.0	128.0	21.0	220.5	41.0	492.5	15.2	1.26	550.0
C-129	18.0	162.0	0.5	0.1	0.5	0.1	47.0	762.5	23.5	1.45	834.5
C-131	9.5	45.1	0.5	0.1	4.0	8.0	49.0	872.5	26.8	1.51	949.8
C-145	14.5	105.1	1.0	0.5	0.5	0.1	63.0	1922.5	59.2	1.94	2046.6
C-163	8.0	32.0	21.0	220.5	11.5	66.1	45.0	662.5	20.4	1.38	729.3
C-167	1.5	1.1	13.0	84.5	17.0	144.5	57.0	1412.5	43.5	1.75	1514.8
C-172	12.5	78.1	24.0	288.0	26.0	338.0	10.0	531.3	16.3	0.31	557.9
C-179	12.5	78.1	21.0	220.5	0.5	0.1	52.0	1056.3	32.5	1.60	1142.4
C-184	6.0	18.0	6.0	18.0	5.5	15.1	5.0	762.5	23.5	0.15	791.2
C-185	0.0	0.0	23.0	264.5	13.0	84.5	39.0	422.5	13.0	1.20	475.7
C-189	11.5	66.1	22.0	242.0	3.5	6.0	25.0	212.5	6.5	0.77	244.8
C-197	4.5	10.1	16.5	136.1	13.0	84.5	59.0	1572.5	48.4	1.82	1681.7
C-216	7.5	28.1	6.5	21.1	2.5	3.1	55.0	1262.5	38.8	1.69	1358.0
C-223	1.5	1.1	8.0	32.0	0.0	0.0	19.0	272.5	8.4	0.58	300.5
C-224	2.5	3.1	11.0	60.5	5.5	15.1	23.0	222.5	6.8	0.71	253.0
C-231	8.5	36.1	13.0	84.5	6.5	21.1	14.0	391.3	12.0	0.43	417.7
C-233	23.5	276.1	0.0	0.0	1.0	0.5	61.0	1742.5	53.6	1.88	1859.0
C-267	6.0	18.0	4.5	10.1	1.5	1.1	17.0	312.5	9.6	0.52	339.6
C-283	8.0	32.0	6.0	18.0	6.0	18.0	36.0	336.3	10.3	1.11	383.7
C-305	1.5	1.1	6.0	18.0	6.0	18.0	33.0	272.5	8.4	1.02	314.9
C-313	17.5	153.1	8.0	32.0	8.0	32.0	22.0	231.3	7.1	0.68	261.1
C-334	8.0	32.0	2.5	3.1	3.5	6.1	36.0	336.3	10.3	1.11	383.7
C-337	17.0	144.5	7.0	24.5	7.0	24.5	25.0	212.5	6.5	0.77	244.8
C-339	34.0	578.0	3.0	4.5	4.0	8.0	49.0	872.5	26.8	1.51	949.8
C-363	5.0	12.5	17.0	144.5	8.0	32.0	7.0	662.5	20.4	0.22	690.1
C-369	13.0	84.5	7.5	28.1	5.0	12.5	51.0	992.5	30.5	1.57	1075.6
C-372	1.0	0.5	58.0	1682.0	44.5	990.1	7.0	662.5	20.4	0.22	690.1
C-HUA09	5.0	12.5	27.0	364.5	5.0	12.5	45.0	662.5	20.4	1.38	729.3
PUE-636	18.0	162.0	53.0	1404.5	9.5	45.1	14.0	391.3	12.0	0.43	417.7
PUE-637	17.5	153.1	6.5	21.1	7.0	24.5	21.0	242.5	7.5	0.65	271.7
PUE-651	56.0	1568.0	18.5	171.1	20.0	200.0	22.0	231.3	7.1	0.68	261.1

Con base en trabajos previos de comparación de medidas paramétricas y no paramétricas para medir estabilidad de genotipos, indican que ambos enfoques son complementarios (Akcura y Kaya, 2008; Mohammadi *et al.*, 2009; Delic *et al.*, 2009; Kilic, 2012). En este estudio, los índices de Huehn utilizados reflejaron la interacción población-localidades de evaluación y ayudaron a definir, con mayor fiabilidad, la estabilidad de las poblaciones no solo basadas en su comportamiento del rendimiento de grano.

Es importante remarcar que la colección evaluada, teóricamente, proviene de poblaciones altamente variables y heterogéneas lo que se observó en alta variabilidad de respuesta promedio a través de localidades.

CONCLUSIONES

Las poblaciones de maíz azul evaluadas presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) a través de localidades de evaluación, las localidades también mostraron contrastes significativos de respuesta en el comportamiento promedio de las poblaciones, y se presentaron interacciones significativas entre localidades y poblaciones evaluadas. Todo esto en relación a floración femenina, diámetro, longitud e hileras de granos en mazorca, longitud y ancho de grano, peso y volumen de 1000 granos, y rendimiento experimental. Las estimaciones de mazorcas enfermas con pudriciones y dañadas por plagas, y porcentaje de acame difirieron significativamente ($p < 0.05$) entre poblaciones y entre localidades de evaluación, pero no en la interacción localidades-poblaciones. Las afectaciones de mazorcas enfermas por pudriciones y daños por plagas, porcentaje de acame y desadaptaciones hizo que no se obtuviera información agronómica, en ambos ambientes, para las poblaciones siguientes: PUE-339 de Puebla, A-03 de Chalcatongo de Hidalgo, A-10 y A-21 de San Miguel El Grande, C-169 y C-190 de San Esteban Atlatlahuca, Oaxaca.

En análisis de componentes de varianza fenotípica, reflejó que la varianza ambiental fue significativamente más importante que la varianza genotípica y que la varianza de la interacción genotipo-ambiente, en todos los caracteres agronómicos evaluados, excepto en número de hileras en mazorca, relación largo/ancho de grano y volumen de 1000 granos. En estos casos la varianza genotípica fue mayor que la ambiental y se reflejó en altos valores de heredabilidad en el sentido amplio ($0.28 < H^2 < 0.39$). Los valores bajos de heredabilidad (< 1.0) en rendimiento de grano por parcela experimental y días a floración indican que son caracteres complejos, y que las poblaciones nativas fueron altamente variables para estos caracteres. Los estimadores no paramétricos de estabilidad de Huehn permitieron identificar dos grupos de poblaciones sobresalientes: 1) poblaciones de maíz azul con mayor grado de estabilidad en días a floración, peso y volumen de 1000 granos y rendimiento experimental, entre estas: A-01, A-07, A-23, C-223, C-224, C-305 y C-334; y 2) un grupo de poblaciones estables en rendimiento: A-19, A-25, C-12, C-05, C-189 y C-313, las que no necesariamente fueron estables en días a floración masculina ni en peso y volumen de 1000 granos.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Castillo, J. A., A. Carballo-Carballo, F. Castillo-González, A. Santacruz-Varela, J. A. Mejía-Contreras, J. Crossa-Hiriarte, G. Baca-Castillo. 2006. Diversidad fenotípica y variantes distintivas de la raza jala de maíz. *Agricultura Técnica en México* 32: 57-66.
- Akcura, M. and Y. Kaya. 2008. Nonparametric stability methods for interpreting genotype by environment interaction of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.). *Genetic and Molecular Biology* 31: 906-913.
- Ángeles-Gaspar, E., E. Ortiz-Torres, P.A. López, G. López-Romero. 2010. Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 287-296.
- Antonio, M. M., J. L. Arellano V., G. García de-los-S., S. Miranda C., J. A. Mejía C., F. V. González C. 2004. Variedades criollas de maíz azul raza chalqueño. Características agronómicas y calidad de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27: 9-15.

- Arellano, V. J. L., C. Tut C., A. María R. Y. salinas M., O. R. Taboada G. 2003. Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 26: 101-107.
- Becker, H. C. and J. Leon. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101:1-23.
- Carballoso-Torrecilla, V., A. Mejía-Contreras., S. Balderrama-Castro., A. Carballo- Carballo, F. V. González-Cossio. 2000. Divirgencia en poblaciones de maíz nativas de Valles Altos de México. *Agrociencia*. 34 (2): 167-174.
- Cadena-Meneses, J. A. y A. Castillo-Morales. 2000. Una comparación de SAS y Harvey en la estimación de componentes de varianza en modelos mixtos. *Agrociencia* 34: 57-68.
- Castro-Nava, S., V. H. Ramos-Ortíz, C. A. Reyes-Méndez, F. Briones-Encina, J. A. López-Santillán. 2011. Preliminary field screening of maize landrace germplasm from northeastern Mexico under high temperatures. *Maydica* 56: 77-82.
- CIMMYT, programa de maíz del CIMMYT. 2004. Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en campo. CIMMYT. México, D. F. 118 p.
- Crossa, J., M. Vargas, A. K. Joshi. 2010. Linear, bilinear, and linear-linear fixed and mixed models for analyzing genotype x environment interaction in plant breeding and agronomy. *Canadian Journal of Plants Science* 90: 561-578.
- Delic, N., G. Stankovic, K. Konstantinov. 2009. Use of non parametric statistics in estimation of genotypes stability. *Maydica* 54:155-160.
- Eberhart, S. A. and W. A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6:36-40.
- Gabriel, K. R. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58: 453-467.
- Gauchan, H. G., H. P. Piepho, P. Annicchiarico. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Science* 48: 866-889.
- González. H. A., D. J. Pérez L., A. Domínguez L., O. Franco M., A. Balbuena M., A. Ramos M. J. Sahagún C. 2008. Variabilidad genética, diversidad fenotípica e identificación de poblaciones sobresalientes de maíz cacahuacintle. *Ciencia ergo sum* 15: 297-305.
- González, H. A., J. Sahagún C., D. J. Pérez L., A. Domínguez L., R. Serrato C., V. Landero F., E. Dorantes C. 2006. Diversidad fenotípica del maíz cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 255-261.
- Hortelano, S. R., R. A. Gil M., A. Santacruz V., S. Miranda C., L. Córdova T. 2008. Diversidad morfológica de maíces nativos del Valle de Puebla. *Agricultura Técnica en México* 34:189-200.
- Huehn, M. 1979. Beitrag zur erfassung der phanotypischen stabilitat. *EDV in Medizin und Biologie* 10:112-117.
- Huehn, M. 1990a. Nonparametric measures of phenotypic stability. 1. Theory. *Euphytica* 47:189-194.
- Huehn, M. 1990b. Nonparametric measures of phenotypic stability. 2. Applications. *Euphytica* 47:195-201.
- Khuri, A. I. 2000. Designs for variance components estimation: past and present. *International Statistical Review* 68: 311-322.
- Kilic, H. 2012. Assessment of parametric and non-parametric methods for selecting stable and adapted spring bread wheat genotypes in multi-environments. *The Journal of Animal and Plants Science* 22: 390-398.

- López-Romero, G., A. Santacruz-Varela, A. Muñoz-Orozco, F. Castillo-González, L. Córdova-Téllez, H. Vaquera-Huerta. 2005. Caracterización morfológica de poblaciones nativas de maíz del Istmo de Tehuantepec, México. *Interciencia* 30: 284-290.
- Luna-Ortega, J. G., J. L. García-Hernández., R. D. Valdez-Cepeda., M. A. Gallegos- Robles., P. Preciado-Rangel., C. Guerrero-Guerrero A. Espinoza-Banda. 2013. Aptitud combinatoria y componentes genéticos en líneas de maíz. *Universidad y Ciencia* 29: 243-253.
- Mohammadi, R., M. Aghaee, R. Haghparast, S. S. Pourdard, M. Rostaii, Y. Ansari, A. Abdolahi and A. Amri. 2009. Association among non-parametric measures of phenotypic stability in four annual crops. *Middle Eastern and Russian Journal of Plant Sciences and Biotechnology* 3(Spec. 1): 20-24.
- Nassar, R. and M. Huehn. 1987. Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for non-parametric measures of phenotypic stability. *Biometrics* 43: 45-53.
- Ortega C., A. 1987. Insectos nocivos del maíz: una guía para su identificación en campo. CIMMYT. México, D.F. 106 p.
- Pecina-Martínez, J., M. C. Mendoza-Castillo, J. A. López-Santillán, F. Castillo-González, M. Mendoza-Rodríguez. 2009. Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia* 43: 581-694.
- Pecina-Martínez, J., M. C. Mendoza C., J. A. López S., F. Castillo G., M. Mendoza R., J. Ortiz C. 2011. Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34: 85-92.
- Piepho, H. P., and S. Lotito. 1992. Rank correlation among parametric and nonparametric measures of phenotypic stability. *Euphytica* 64: 221-225.
- Rodríguez, P. J. E., J. Sahagún C., H. E. Villaseñor M., J. D. Molina G., A. Martínez G. 2002. Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.) de temporal. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:143-151.
- Statistical Analysis System (SAS). 2000. Statistics Analysis system. Software Release 8.1. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Shimelis, H. and R. Shiringani. 2010. Variance component and heritabilities of yield and agronomic traits among cowpeas genotypes. *Euphytica* 176:383-389.
- Smith, M. E., F. Castillo G. and F. Gómez. 2001. Participatory plant breeding with maize in Mexico and Honduras. *Euphytica* 122: 551-565.
- Vargas Escobar, E. A., J. E. Vargas Sánchez, D. Baena García. 2016. Analysis of stability and adaptability of QPM hybrids of maize growing in different Colombian agroecological zones. *Acta Agronómica* 65 (1): 72-79.
- Vielle-Calzada, J. P. and J. Padilla. 2009. The Mexican landraces: description, classification and diversity. *In: Handbook of Maize: Its Biology*. J. L. Bennetzen and S. C. Hake (eds.). Springer Science, Ney York, NY, USA. pp: 543-561.
- Wellhausen, E. J., L. M. Roberts y E. X. Hernández (en colaboración con P. C. Mangelsdorf). 1951. Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. Folleto Técnico No. 5, Oficina de Estudios Especiales, Secretaria de Agricultura y Ganadería. México, D.F. 237 p.
- Yan, W., L. A. Hunt, Q. Sheng and Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science* 40: 597-605.
- Yan, W., M. S. Kang, B. Ma, S. Woods and P. L. Cornelius. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science* 47:643-655.
- Zambrano, Z. E. E., J. R. Francisco L. A., F. D. Alarcón C., J. P. Villavicencio L., M. Brainer Caicedo V., J. F. Eguez M., J. L. Zambrano M. 2017. Interacción genotipo ambiente de

híbridos de maíz bajo temporal en Manabí y los ríos, Ecuador. Revista ESPAMCIENCIA 8(1): 7-14.