

RENDIMIENTO Y CALIDAD INTRÍNSECA DE CRUZAS DE MAÍZ DE CALIDAD PROTEÍNICA EN AMBIENTES DE VALLES ALTOS DE MÉXICO

YIELD AND INTRINSIC QUALITY OF PROTEIN QUALITY MAIZE CROSSES AT ENVIRONMENTS OF HIGH VALLEYS OF MEXICO

Consuelo López-López¹, Alejandro Espinosa-Calderón², Margarita Tadeo-Robledo³,
Ma. Gricelda Vázquez-Carrillo^{2*}, J. Jesús García-Zavala¹

¹Genética. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo. Estado de México. (lopez.consuelo@colpos.mx; zavala@colpos.mx). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Km 13.5 Carretera Los Reyes-Texcoco. 56250, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. (espinoale@yahoo.com.mx), (gricelda_vazquez@yahoo.com). ³Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucán, Km 2.5. 54714. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. (tadeorobledo@yahoo.com).

RESUMEN

El grano de maíz es deficiente en lisina y triptófano, aminoácidos esenciales para la alimentación humana. La generación de genotipos con granos más nutritivos puede incidir de manera favorable en la salud de la población. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de localidad sobre el rendimiento, las propiedades físicas y la calidad de la proteína del grano de 18 cruzas simples de maíz con calidad proteínica (QPM) (*Zea mays* L.). Los genotipos QPM resultaron de la cruce de seis líneas androestériles QPM (LQ1, LQ2, LQ3, LQ4, LQ5 y LQ6) y tres líneas élite QPM (CML173, CML354 y CML352), y se evaluaron en dos localidades: FESC-UNAM y CEVAMEX-INIFAP, en primavera y verano de 2014. Las variables evaluadas fueron el rendimiento, peso hectolítrico, peso de cien granos, índice de flotación, proteína, lisina, triptófano e índice de calidad, en el Laboratorio de Maíz del INIFAP. Para todas las variables se realizó un análisis de varianza combinado e individual y se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey). Las cruzas simples con productividad mayor y mejores características físicas de calidad (en ambas localidades) fueron LQ6 x CML352, LQ3 x CML352 y LQ4 x CML354, presentaron granos de tamaño mediano y de textura intermedia y dura. Solo la cruce LQ5 x CML354 presentó el porcentaje de triptófano y lisina cercanos a lo indicado en la literatura para declarar a un maíz como de calidad proteínica.

Palabras clave: maíz de calidad proteínica, QPM, rendimiento, localidad, propiedades físicas, calidad proteínica.

ABSTRACT

Maize grain is deficient in lysine and tryptophan, essential amino acids for human nutrition. The generation of genotypes with more nutritious grain could favor people's health. The objective of this study was to determine the effect of location on yield, physical properties and protein quality of the grain of 18 single cross quality-protein maize (QPM) (*Zea mays* L.). The QPM genotypes resulted from the cross of six male-sterile QPM lines (LQ1, LQ2, LQ3, LQ4, LQ5 and LQ6) and three elite QPM lines (CML173, CML354 y CML352). These genotypes were evaluated in two locations, FESC-UNAM and CEVAMEX-INIFAP, in spring and summer 2014. The evaluated variables were yield, hectoliter weight, 100 grain weight, floatation index, protein, lysine, tryptophan and quality index in the Laboratorio de Maíz of INIFAP. For all the variables, an analysis of variance, combined and individual, and the Tukey test of comparison of means were performed. The simple crosses with higher productivity and better physical quality characteristics (in both localities) were LQ6 x CML352, LQ3 x CML352 and LQ4 x CML354, which had medium-size grains and medium and hard texture. Only the LQ5 x CML354 cross had percentages of tryptophan and lysine close to those indicated in the literature for quality-protein maize.

Key words: quality-protein maize, QPM, yield, locality, physical properties, quality-protein.

INTRODUCTION

Interest in improving protein quality of cereals is a topic that has stimulated the generation of genotypes with more nutritious grains to

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: abril, 2020. Aprobado: septiembre, 2020.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 1079-1090. 2020.

INTRODUCCIÓN

El interés por mejorar la calidad de la proteína de los cereales es un tema que estimula la generación de genotipos con granos más nutritivos pues incide favorablemente en la salud de la población, así como en la alimentación de animales no rumiantes (Nuss y Tanumihardjo, 2011; Dei, 2017). El maíz (*Zea mays* L.) es el alimento básico de millones de habitantes en el mundo, en especial en México (FIRA, 2015). El grano aporta 15 a 56% de todas las calorías ingeridas por los seres humanos. El maíz consumido cada día es deficiente en aminoácidos esenciales pues contiene 1.6% de lisina y 0.47% de triptófano, mientras que el maíz de calidad proteínica o QPM (por sus siglas en inglés) es más nutritivo, ya que contiene en promedio >3.5% de lisina y >0.75% de triptófano en proteína (Twumasi *et al.* 2016). Por consiguiente, se deben ingerir como parte de la dieta para completar el perfil de aminoácidos esenciales requerido para la síntesis de proteínas (Vivek *et al.*, 2008).

Vasal *et al.* (1980), por medio de mejoramiento convencional, aumentaron el rendimiento del maíz QPM y lograron convertir los granos caracterizados por una textura suave y densidad baja, en granos con textura dura. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en coordinación con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), realizaron proyectos en maíces QPM en los estados de Guerrero y Chiapas. En el año 2000, con los resultados de esas actividades se realizó la inscripción de híbridos y variedades en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) (Espinosa *et al.*, 2005).

Después del 2000, solo se han registrado nuevos materiales QPM para la Meseta Comiteca, los Altos de Chiapas y el subtrópico de México (Coutiño y Vázquez, 2018; Coutiño *et al.*, 2018; CNVV, 2018). En Valles Altos del Centro de México es poco lo realizado para generar materiales QPM con calidad nutricional alta (Vázquez *et al.*, 2012, 2013). La investigación sobre la calidad del grano de los maíces con calidad de proteína, así como la influencia del ambiente sobre esos genotipos en la expresión de las propiedades físicas y químicas del grano es mínima. Vázquez *et al.* (2012) evaluaron híbridos de maíz de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos de México (H-143C, H-145C, H-147C y

favorably drive the health of the population, as well as to improve non-ruminant animal feeding (Nuss and Tanumihardjo, 2011; Dei, 2017). Maize (*Zea mays* L.) is the basic food of millions of inhabitants worldwide, especially in Mexico (FIRA, 2015). This grain supplies 15 to 56% of all the calories ingested by humans. The maize consumed every day is deficient in essential amino acids, containing 1.6% lysine and 0.47% tryptophan, while quality-protein maize (QPM) is more nutritious, containing on average >3.5% lysine and >0.75% tryptophan in protein (Twumasi *et al.*, 2016), which should be eaten as part of the diet to complete the profile of essential amino acids required for protein synthesis (Vivek *et al.*, 2008).

Vasal *et al.* (1980), by conventional breeding, increased the yield of QPM and converted the grains characterized by their soft texture and low density into hard-textured grains. The Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) in coordination with the Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) carried out projects in QPM in the states of Guerrero and Chiapas. In 2000, with the results of these activities, these hybrids and varieties were registered in the Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) (Espinosa *et al.*, 2005).

After 2000, new QPM materials have been registered only for the Meseta Comiteca of Los Altos de Chiapas and subtropical Mexico (Coutiño and Vázquez, 2018; Coutiño *et al.*, 2018; CNVV, 2018). In the High Valleys of Central Mexico, little has been done to generate QPM materials with high nutritional quality (Vázquez *et al.*, 2012, 2013). Research on the grain quality of quality-protein maize and how the environment affects these genotypes in the expression of the physical and chemical properties of the grain is scarce. Vázquez *et al.* (2012) evaluated protein quality maize hybrids developed for the High Valleys of Mexico (H-143C, H-145C, H-147C and H-149C), but of this group, only the hybrid H-143C was released in 2008 (CNVV, 2018).

Evaluating the effect of environment on physicochemical and quality characteristics of tortillas made from QPM hybrids developed for the High Valleys, it was found that they maintained lysine and tryptophan contents, and tortillas of better quality than those of the control were obtained (Vázquez *et al.*, 2012). According to Mittelman *et*

H-149C), pero de ese grupo solo se liberó el híbrido H-143C en el año 2008 (CNVV, 2018).

Al evaluar el efecto del ambiente en las características fisicoquímicas y la calidad de tortillas de híbridos de maíz QPM, desarrollados para Valles Altos, se encontró que mantuvieron los contenidos de lisina y triptófano y se obtuvieron tortillas con mejor calidad que los testigos (Vázquez *et al.*, 2012). De acuerdo con Mittelman *et al.* (2003), los principales factores ambientales que afectan el contenido de proteína en el grano son la temperatura, la disponibilidad de agua y la de nitrógeno en el suelo. La densidad de la población es otro factor que afecta la calidad de la proteína, pero ésta se mantiene en los niveles propios de un maíz QPM (Vázquez *et al.*, 2013).

La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) ha desarrollado líneas progenitoras de híbridos que poseen androesterilidad, en las cuales se incorporó la característica de alta calidad proteínica (QPM). Dentro de las ventajas de utilizar materiales androestériles destaca la reducción significativa de los costos de producción en el incremento de semilla de maíz híbrida (Canales *et al.*, 2017).

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de localidad en el rendimiento, las características físicas y la calidad de la proteína del grano de 18 cruza simples de maíz QPM. La hipótesis fue que al menos una cruza cumple con la calidad para ser promovida como un maíz QPM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el ciclo primavera y verano de 2014 se sembraron 18 cruza simples de maíz de calidad proteínica y los híbridos trilineales H-53 AE y Tsíri Puma de grano de endospermo normal como testigos en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM) y el Campo Experimental del Valle de México (CEVAMEX-INIFAP). Los híbridos simples son cruza entre seis líneas androestériles QPM (LQ1, LQ2, LQ3, LQ4, LQ5 y LQ6) y tres líneas élite QPM procedentes del CIMMYT (CML173, CML354 y CML352). La FESC-UNAM está ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, México (19° 41' N, 99° 11' O; 2274 m de altitud), y tiene suelo de textura franco arcillosa. La otra localidad fue Santa Lucía de Prías, Coatlinchán, municipio de Texcoco, estado de México (19° 27' N, 98° 51' O, 2240 m de altitud), con suelo de textura franco arenosa.

Los 18 genotipos y los testigos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La siembra se realizó con una densidad de población de 65 000

al. (2003), the main environmental factors that affect protein content in the grain are temperature and the availability of water and nitrogen in the soil. Population density is another factor that affects protein quality but remains at levels characteristic of QPM (Vázquez *et al.*, 2013).

The Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán of Universidad Nacional Autónoma de México (FESC-UNAM) has developed hybrid progenitor lines that are male-sterile to which the high quality protein (QPM) trait has been incorporated. Among the advantages of using male-sterile materials, it is outstanding the significant reduction in production costs on increasing hybrid maize seed (Canales *et al.*, 2017).

The objective of this study was to determine the effect of locality on yield, physical characteristics and grain protein quality of 18 single cross QPM. The hypothesis was that at least one cross would have the quality necessary to be promoted as a QPM.

MATERIALS AND METHODS

During the spring and summer cycles of 2014, 18 quality protein maize single crosses and the trilinear hybrids H-53 AE and Tsíri Puma of normal endosperm as controls were planted in FESC-UNAM and in the Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX-INIFAP). The single-cross hybrids were crosses between male-sterile QPM lines (LQ1, LQ2, LQ3, LQ4, LQ5 and LQ6) and three elite QPM lines from CIMMYT (CML173, CML354 and CML352). FESC-UNAM is located in the municipality of Cuautitlán Izcalli, Mexico (19° 41' N, 99° 11' W, 2274 m altitude); the soil has a clay loam texture. The other locality was Santa Lucía de Prías, Coatlinchán, Municipality of Texcoco, state of Mexico (19° 27' N, 98° 51' W, 2240 m altitude), with sandy-loam soil.

The 18 genotypes and the controls were evaluated in a complete randomized block design with three replications. Seeds were planted at a population density of 65 000 plants ha⁻¹, and the experimental plot had one row 5 m long and 0.80 m wide. Planting was made in June 2014 in both environments. In Santa Lucía, irrigation was applied only at planting and subsequently moisture was supplied by rainfall. During the crop cycle in Santa Lucía, it hailed before male flowering.

Harvest was manual in both environments in December 2014. Five ears were selected at random from each experimental unit and de-grained by hand to obtain the amount of grain necessary for the tests.

plantas ha⁻¹, y la parcela experimental tuvo un surco de 5 m de largo por 0.80 m de ancho. La siembra se efectuó en junio de 2014 en ambos ambientes. En Santa Lucía se aplicó riego en la siembra y después se aplicaron dos riegos de auxilio. En FESC-UNAM solo se aplicó un riego a la siembra, y la humedad posterior se cubrió con la precipitación pluvial. Durante el ciclo de cultivo en Santa Lucía ocurrieron dos granizadas antes de la floración masculina.

La cosecha fue manual en ambos ambientes y se realizó en diciembre de 2014. Al azar se tomaron cinco mazorcas de cada unidad experimental y se desgranaron a mano para tener la cantidad de grano necesario para realizar las pruebas pertinentes.

El rendimiento se evaluó como lo describieron López *et al.* (2017) y se expresó en Mg ha⁻¹. Las variables físicas evaluadas en los granos fueron: peso hectolítrico (PH) o densidad aparente, según el método 84-10 de la *American Association of Cereal Chemistry* (AACC, 2000), peso de 100 granos (PCG), que es una medida indirecta del tamaño del grano (Billeb y Bressani, 2001), y el índice de flotación (IF) como medida indirecta de la dureza del grano (NMX-FF-034/1-SCFI-2002; SE, 2002).

Para el contenido de proteína, primero se determinó el contenido de nitrógeno con el equipo Technicon y se usó un factor de conversión a proteína de 6.25 (método 46-13 de la AACC, 2000). La lisina y el triptófano se cuantificaron de acuerdo con los métodos colorimétricos de Tsai *et al.* (1975), modificados por Villegas *et al.* (1984) y de Nurit *et al.* (2009), respectivamente. Los resultados se expresan en g de aminoácido por 100 g de proteína.

El índice de calidad de proteína (ICP) es uno de los criterios para calificar a un maíz como genotipo QPM (Vivek *et al.*, 2008; Twumasi *et al.*, 2016) y se obtiene al dividir el porcentaje de triptófano entre el porcentaje de proteína y multiplicar el resultado por 100. Cuando el ICP es superior a 0.6, el genotipo se considera QPM; sin embargo, también es importante tener en cuenta los contenidos de lisina y triptófano. Este criterio se puede justificar ya que por lo regular solo se analiza el triptófano, porque los valores de lisina y triptófano tienen una correlación alta (Vivek *et al.*, 2008).

Análisis estadístico

Con los datos se realizó un análisis de varianza combinado, donde el efecto de los genotipos se consideró fijo y el de ambiente aleatorio (dos ambientes) (Sahagún, 1998). Además, se hicieron análisis estadísticos individuales para cada localidad para conocer el comportamiento de los genotipos. Las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para cada variable. Los procedimientos se hicieron con SAS® versión 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

Yield was assessed as described by López *et al.* (2017) and expressed in Mg ha⁻¹. The following physical variables were evaluated in grain: hectoliter weight (PH) or bulk density, according to method 84-10 of the *American Association of Cereal Chemistry* (AACC, 2000), 100 grain weight (PCG), which is an indirect measure of grain size (Billeb and Bressani, 2001), and the floatation index (IF) as an indirect measure of grain hardness (NMX-FF-034/1-SCFI-2002; SE, 2002).

For protein content, nitrogen content was determined at first with Technicon equipment, and a protein conversion factor of 6.25 was used (method 46-13 of the AACC, 2000). Lysine and tryptophan were quantified following the colorimetric methods of Tsai *et al.* (1975), modified by Villegas *et al.* (1984) and Nurit *et al.* (2009), respectively. The results are expressed in g amino acid 100 g⁻¹ protein.

The index of protein quality (ICP) is one of the criteria used to grade a maize as a QPM genotype (Vivek *et al.*, 2008; Twumasi *et al.*, 2016). It is obtained by dividing the percentage of tryptophan by the percentage of protein and multiplying the result by 100. When the ICP is above 0.6, the genotype is considered QPM. However, it is also important to bear in mind the lysine and tryptophan contents. This criterion can be justified; usually only tryptophan is analyzed because lysine values correlate highly with tryptophan values (Vivek *et al.*, 2008).

Statistical analysis

With the data, a combined analysis of variance was performed; the effect of the genotypes was considered fixed and that of the environments, random (two environments) (Sahagún, 1998). In addition, individual statistical analyses were conducted for each locality to discriminate genotype behavior. To compare means, the Tukey test ($p \leq 0.05$) was used for each variable. The procedures were performed with SAS® version 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

RESULTS AND DISCUSSION

With the combined analysis of variance, highly significant differences ($p \leq 0.01$) were found between environments (A), among genotypes (G) and in the interaction (A x G) for all variables except 100 grain weight. The significance detected in the interaction showed that both factors jointly affected the variables. The reduced values of the coefficient of variation indicated adequate control (< 7%) of the experimental variation (Table 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el análisis de varianza combinado se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre ambientes (A), entre genotipos (G) y en la interacción (A x G) para todas las variables, excepto para peso de 100 granos. La significancia detectada en la interacción mostró que ambos factores influyeron conjuntamente en las variables. Los valores reducidos del coeficiente de variación indicaron un control adecuado ($< 7\%$) de la variabilidad experimental (Cuadro 1).

La significancia detectada entre localidades indica que los ambientes de evaluación tuvieron diferencias en sus condiciones agroecológicas como la precipitación (825 en FESC-UNAM y 723 mm en CEVAMEX). La lluvia se presentó de manera irregular a lo largo del ciclo del cultivo (junio-diciembre), sobre todo en CEVAMEX (estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo). La estación meteorológica de la FESC-UNAM registró la temperatura máxima (26.4 °C) en agosto, y en Santa Lucía la temperatura máxima (25 °C) fue en junio y agosto; estos meses coinciden con la siembra e inicio de la floración. También hubo ausencia de lluvia en dicho periodo más el efecto de las granizadas que ocurrieron en CEVAMEX.

El rendimiento mayor se registró en el ambiente de la FESC-UNAM (Cuadro 2) lo cual se atribuye a la mejor textura del suelo (franco arcilloso) y la distribución de las lluvias, así como a la ausencia de

The significance detected between localities indicates that the environments of the evaluation were different in their agro-ecological conditions, such as precipitation (825 mm in FESC-UNAM and 723 mm in CEVAMEX). Rainfall was irregularly distributed throughout the crop cycle (June-December), especially in CEVAMEX (weather station of the Universidad Autónoma Chapingo). The weather station of the FESC-UNAM registered the maximum temperature (26.4 °C) in August and in Santa Lucía the maximum temperature (25 °C) was in June and August, coinciding with planting and beginning of flowering. There was also an absence of rain in this period, plus the effect of the hailstorms that occurred in CEVAMEX.

The higher yield was recorded in the FESC-UNAM environment (Table 2). This is attributed to better soil texture (clay loam), distribution of rainfall, and absence of hailstorms. In contrast, in CEVAMEX, the soil is sandy (little moisture retention), precipitation was low (< 80 mm) in August, and hailstorms occurred (August 17 and September 12) during the grain fill stage that affected genotype yield (Table 2) (López *et al.*, 2017).

Genotype effect

All the genotypes had higher yield in FESC-UNAM. Sala *et al.* (2007) mentioned that the number of maize grains is the characteristic which is most sensitive to environmental variation, and it

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis combinado para variables de rendimiento y calidad intrínseca de maíces QPM y testigos comerciales evaluados en dos ambientes del Estado de México. Ciclo primavera-verano 2014.

Table 1. Mean squares and statistical significance of the combined analysis for the variables yield and intrinsic QPM quality and commercial controls evaluated in two environments of the state of Mexico. Spring-summer cycle 2014.

F V	Ambiente (A)	Genotipo (G)	A x G	Media	CV (%)
Rendimiento	195.406 [†]	11.508 [†]	4.527 [†]	5.7	5.9
Peso hectolítrico	456.3 [†]	18.96 [†]	20.4 [†]	74.1	1.8
Peso de 100 granos	36.3 [†]	20.90 [†]	0.65	32.3	3.3
Índice de flotación	8.53 [†]	561.34 [†]	50.76 [†]	28.8	4.7
Proteína	15.7 [†]	1.61 [†]	1.07 [†]	10.0	3.7
Triptófano	0.17 [†]	0.028 [†]	0.025 [†]	0.65	4.5
Lisina	1.04 [†]	0.653 [†]	0.186 [†]	2.8	5.4

[†] $p \leq 0.01$; FV: Fuente de variación; CV: Coeficiente de variación en porcentaje. ♦ [†] $p \leq 0.01$; FV: Source of variation; CV: Coefficient of variation in percentage.

Cuadro 2. Efecto del ambiente sobre el rendimiento y calidad intrínseca del grano de cruzas simples de maíz blanco QPM para los Valles Altos de México. Ciclo primavera-verano 2014.

Table 2. Effect of environment on yield and intrinsic grain quality in single crosses of white QPM for the High Valleys of Mexico. Spring-summer cycle 2014.

Variable	Ambientes		
	FESC-UNAM	CEVAMEX-INIFAP	DSH
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	7.04 a	4.48 b	0.12
Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	72.18 a	76.08 b	0.49
Peso de 100 granos (g)	32.90 a	31.80 b	0.39
Índice de flotación	28.60 b	29.08 a	0.49
Proteína (%)	9.70 b	10.40 a	0.13
Triptófano (%)	0.61 b	0.68 a	0.01
Lisina (%)	2.73 b	2.91 a	0.05

Medias con letra diferente en cada hilera indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). DSH, diferencia significativa honesta. ♦ Means in a row with different letters are statistically different (Tukey; $p \leq 0.05$). DSH, honest significant difference.

granizadas. En CEVAMEX el suelo es arenoso (tiene poca retención de humedad), una precipitación reducida (< 80 mm) en agosto, y granizadas (17 de agosto y 12 de septiembre) que afectaron el rendimiento de los genotipos (Cuadro 2) durante la etapa del llenado del grano (López *et al.*, 2017).

Efecto de genotipo

Todos los genotipos tuvieron un rendimiento mayor en FESC-UNAM. Sala *et al.* (2007) mencionaron que el número de granos de maíz es la característica más sensible a la variación ambiental dada por diversos componentes (radiación, temperatura, agua y nutrientes en el suelo). Las diferencias ambientales propias del ciclo de producción (primavera y verano de 2014) condicionaron el desarrollo de los genotipos. En FESC-UNAM las cruzas simples LQ2 x CML354, LQ3 x CML173, LQ4 x CML173 y LQ5 x CML352 superaron en rendimiento al híbrido testigo H-53AE (Cuadro 3), así como al rendimiento medio nacional (3.5 Mg ha⁻¹) y a la media para Valles Altos (3.2 Mg ha⁻¹) (SIAP, 2017). La cruz LQ2 x CML354 presentó la diferencia de rendimiento mayor entre localidades, por lo que puede considerarse como inestable.

Los pesos hectolítricos de las cruzas en el ambiente de CEVAMEX tuvieron valores de 68.5 a 75 kg hL⁻¹, pero las cruzas en el ambiente de la FESC-UNAM

has diverse components (radiation, temperature, water, soil nutrients). The environmental differences particular to the production cycle (spring-summer 2014) conditioned the development of the genotypes. In FESC-UNAM the single crosses LQ2 x CML354, LQ3 x CML173, LQ4 x CML173 and LQ5 x CML352 surpassed the hybrid control H-53 AE in yield (Table 3) as well as the national mean yield (3.5 Mg ha⁻¹) and the mean for the High Valleys (3.2 Mg ha⁻¹) (SIAP, 2017). The cross LQ2 x CML354 had the greatest difference in yield between localities, and thus can be considered unstable.

Hectoliter weight of the crosses in the CEVAMEX environment had values of 68.5 to 75 kg hL⁻¹, while the crosses in the FESC-UNAM environment showed higher values (70 to 81 kg hL⁻¹). In both environments, the crosses LQ6 x CML352, LQ5 x CML173 and LQ3 x CML352 had values equal to or greater than 74 kg hL⁻¹, the value established in the norm (NMX-FF-034/1- SCFI, 2002) and considered adequate for maize cooked through lime water softening (called in Mexico “nixtamalización”). The crosses that had line LQ2 as the female progenitor were those with the lowest hectoliter weight (< 72 kg hL⁻¹), with the exception of the cross LQ2 x CML352 (Table 3).

Noriega *et al.* (2011) pointed out that grain weight is one of the most stable variables, and according to Billeb and Bressani (2001), hundred grain weight

Cuadro 3. Efecto del ambiente sobre el rendimiento y variables de calidad física del grano de cruzas simples de maíz blanco QPM para los Valles Altos de México. Ciclo primavera-verano 2014.

Table 3. Effect of environment on yield and physical characteristics of the grain of single cross white QPM for the High Valleys of Mexico. Spring-summer cycle 2014.

Genotipo	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX
	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)		PH (kg hL ⁻¹)		PCG (g)	
LQ2 x CML354	9.55 a	2.436ij	71.7 jk	68.5 d	33.0 dh	32.0 ae
LQ3 x CML173	9.30 a	6.58 b	79.7 ab	71.3 ad	31.0 ik	30.0 ce
LQ4 x CML173	9.23 a	7.95 a	78.3 ae	70.3 ad	34.0 cf	34.0 ac
LQ5 x CML 352	8.58 ab	7.56 a	79.0 ad	69.7 bd	34.3 be	33.0 ae
LQ2 x CML173	8.26 ac	2.03j	70.0 k	70.5 ad	32.7 ei	32.0 ae
LQ6 x CML 352	7.71 bd	5.21 e	79.3 ac	74.3 ab	36.0 ab	34.3 ab
LQ5 x CML 173	7.39 be	6.42 bc	78.0 af	74.0 ab	31.3 hk	30.0 ce
LQ3 x CML352	7.27 be	4.52 f	76.0 dh	75.0 a	35.0 ac	34.0 ac
LQ6 x CML 354	7.23 bf	2.99 h	73.0 hk	73.8 ac	31.7 gk	31.0 be
LQ6 x CML 173	7.07 cg	5.01 ef	78.0 bf	70.3 ad	34.7 ad	33.0 ae
H 53 AE	7.07 cg	3.82 g	79.3 ac	69.0 cd	31.7 gk	30.0 ce
LQ4 x CML352	6.72 dg	5.9 cd	75.7 ei	73.5 ad	35.0 ac	33.0 ae
LQ1 x CML352	6.72dg	3.24 gh	77.7 bf	72.5 ad	31.3 hk	29.7 de
LQ5 x CML 354	6.28 eg	3.41 gh	72.7 ik	73.8 ac	32.3 fj	32.0 ae
LQ2 x CML352	6.10 eh	3.59 g	76.3 cg	72.3 ad	32.3 fj	32.3 ae
LQ4 x CML354	6.09 eh	5.32 de	75.0 fi	73.8 ac	36.3 a	35.33 a
Tsíri Puma	5.88 fh	5.17 e	81.0 a	72.7 ad	33.3 cg	31.3 ae
LQ3 x CML354	5.75 gh	3.49 gh	75.0 fi	73.2 ad	30.7 jk	30.0 ce
LQ1 x CML173	4.89 hi	2.9 2hi	72.7 ik	72.0 ad	30.3 ij	29.0 e
LQ1 x CML354	3.63 i	2.18 j	73.3 gj	73.0 ad	30.0 k	29.0 e
DSH	1.37	0.58	3.29	5.015	1.88	4.31

La comparación de medias se hizo entre pares de columnas (2vs3, 4vs5, 6vs7). Medias con diferente letra en cada par de columnas son estadísticamente diferentes (Tukey; p≤0.05). ♦ Comparison of means was performed between pairs of columns (2 vs. 3, 4 vs. 5, 6 vs. 7). Means in each pair of columns with different letters are statistically different (Tukey; p≤0.05).

PH= Peso hectolítrico, PCG= Peso de 100 granos, DSH= diferencia significativa honesta. ♦ PH= Hectoliter weight, PCG= 100 grain weight, DSH= honest significant difference.

mostraron valores superiores (70 a 81 kg hL⁻¹). En ambos ambientes las cruzas LQ6 x CML352, LQ5 x CML173, LQ3 x CML352 presentaron valores iguales o mayores a 74 kg hL⁻¹, el valor establecido en la norma (NMX-FF-034/1- SCFI, 2002) y considerado adecuado para los maíces destinados al proceso de nixtamalización. Las cruzas que tuvieron como progenitor hembra a la línea LQ2, fueron las de PH (< 72 kg hL⁻¹) menor, excepto la cruza LQ2 x CML352 (Cuadro 3).

Noriega *et al.* (2011) señalaron que el peso del grano es una de las variables más estables, y según Billeb y Bressani (2001), el PCG es un indicador del tamaño de grano: entre mayor sea el PCG mayor será el tamaño de grano. Las cruzas y los híbridos (testigos) tuvieron un comportamiento similar (p>0.05),

(PCG) is an indicator of grain size, the higher the PCG, the larger the grain size. Both the crosses and the hybrids (controls) had similar behavior (p≤0.05); the grain size that predominated among the crosses was medium (PCG between 33 - 38 g). The single crosses with higher productivity and better physical quality characteristics (in both localities) were LQ6 x CML352, LQ3 x CML352 and LQ4 x CML354. These crosses had medium grain size (PCG=34 g), PH = 75.7 kg hL⁻¹ and hard and medium hardness grains (IF between 32 and 43 floating grains). Therefore, grains meet the specifications of the norm NMX.034/1-2002 for maize destined for lime water softening and can be recommended to the maize processing industries that produce fresh dough and/or lime water softened maize flour (Table 3).

el tamaño del grano que prevaleció en las cruzas fue mediano (peso de cien granos PCG: 33-38 g). Las cruzas simples con productividad mayor y características físicas de calidad mejores (en ambas localidades) fueron LQ6 x CML352, LQ3 x CML352 y LQ4 x CML354. Estas cruzas presentaron granos de tamaño mediano (PCG=34 g), PH= 75.7 kg hL⁻¹ y granos duros e intermedios (IF entre 32 y 43 granos flotantes); por lo tanto, cumplen con las especificaciones de la norma NMX.034/1-2002 para maíces destinados al proceso de nixtamalización y se pueden considerar para recomendar a las industrias procesadoras de maíz que producen masa fresca o harinas de maíz nixtamalizado o ambas (Cuadro 3).

Respecto a la dureza del grano, en ambos ambientes se identificaron dos tipos de textura: intermedia y dura (índice de flotación menor corresponde a maíces más duros). En CEVAMEX en 13 cruzas prevaleció la textura dura (índice de flotación 16-37), y los dos híbridos comerciales presentaron textura dura en las dos localidades (Cuadro 4). En la FESC-UNAM seis genotipos presentaron dureza intermedia y en CEVAMEX solo cinco fueron consistentes con esta dureza (Cuadro 4). De acuerdo con Vázquez *et al.* (2013), los híbridos H-143C y H-149C también presentaron granos de dureza intermedia, cuando se produjeron con una densidad de población de 67 000 plantas por hectárea, similar a la de nuestro experimento.

En esta investigación se corroboró la hipótesis de Vivek *et al.* (2008), quienes señalaron que el progenitor hembra podría ser el responsable de los genes modificadores de la dureza del grano. Cabe destacar que las líneas elite QPM (machos) presentaron granos de textura suaves. Por la dureza de sus granos, las cruzas simples (Cuadro 4) QPM podrían procesarse por la industria de la masa-tortillas y la de harina nixtamalizada, según Vázquez *et al.* (2014).

De acuerdo con lo indicado por Twumasi *et al.* (2016), los valores de proteína de las cruzas QPM en las dos localidades variaron de 8 a 11% (como un maíz no QPM), intervalo que incluye a los híbridos comerciales usados como testigos en CEVAMEX; y las cruzas en las cuales participó la línea CML352, presentaron valores superiores a 10% de proteína. Esto no sucedió en FESC-UNAM, lo que se atribuye a la interacción genotipo-ambiente. Así, en la localidad con más precipitación (FESC-UNAM), el contenido de proteína fue menor en los genotipos, y

Regarding grain hardness, in both environments two types of texture were identified: medium and hard (a lower floatation index corresponds to harder maize grain). In CEVAMEX in 13 crosses, hard texture prevailed (floatation index 16-37), and the two commercial hybrids had hard texture in both localities (Table 4). Six genotypes in FESC-UNAM and only five in CEVAMEX had intermediate texture (Table 4). According to Vázquez *et al.* (2013), hybrids H-143C and H-149C also had intermediate grains when produced at a population density of 67 000 plant ha⁻¹, a density like that used in our experiment.

In this study we corroborated the hypothesis of Vivek *et al.* (2008), who indicated that the female progenitor could be responsible for genes that modify grain hardness. It is worth highlighting that the elite QPM lines (male) had soft grains. Because of the hardness of their grains, the QPM single crosses could be processed in the maize dough-tortilla and lime water softened maize flour industry, as pointed out by Vázquez *et al.* (2014).

Protein values of QPM crosses in the two localities were in the interval of 8 to 11% (non-QPM), indicated by Twumasi *et al.* (2016). These crosses include the commercial hybrids used as controls in CEVAMEX and the crosses, in which line CML 352 participated, that had protein values above 10%. This did not occur in FESC-UNAM because of the interaction genotype-environment. In this locality there was more precipitation, and the genotypes had lower protein content, coinciding with Vázquez *et al.* (2014), who found that the percentage of protein decreased in evaluated genotypes under irrigation and was higher in rainfed conditions. Both controls had acceptable protein contents, but the Tsíri Puma control was superior in FESC-UNAM than H-53 AE (Table 4).

Protein quality

According to Twumasi *et al.* (2016), for maize to be considered QPM, it must have levels of the essential amino acids lysine and tryptophan above 0.35 and 0.072 g 100 g⁻¹, respectively. The contents in the studied crosses showed that only 22% of the materials achieved the level necessary to consider them quality-protein maize (Table 5). This result is attributed to the interaction of the pollen of the crosses with that of non-QPM plants, which were

Cuadro 4. Efecto del ambiente sobre el índice de flotación, textura y porcentaje de proteína del grano de cruza simples de maíz QPM para los Valles Altos de México. Ciclo primavera-verano 2014.
Table 4. Effect of environment on floatation index, texture, and percentage of protein in grains of single cross QPM developed for the High Valleys of Mexico. Spring-summer cycle 2014.

Genotipo	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX
	Índice de flotación (IF)		Textura		Proteína (%)	
LQ6 x CML 173	46 a	39 ab	intermedio	intermedio	9.8 ad	10.3 bf
LQ4 x CML352	44 ab	42 a	intermedio	intermedio	9.6 ad	11.0 ad
LQ6 x CML 352	43 ac	39 ab	intermedio	intermedio	9.4 ae	10.6 bf
LQ3 x CML352	42 bc	40 ab	intermedio	intermedio	10.3 ac	11.2 ab
LQ4 x CML173	40 cd	38 ab	intermedio	intermedio	9.5 ad	9.6 fg
LQ6 x CML 354	40 cd	37 b	intermedio	duro	9.6 ad	11.0 ad
LQ3 x CML173	38 d	36 b	duro	duro	9.9 ad	10.1 cf
LQ4 x CML354	32 e	36 b	duro	duro	10.4 ab	12.0 a
LQ3 x CML354	30 ef	20 ef	duro	duro	9.8 ad	10.0 df
LQ1 x CML352	28 f	30 c	duro	duro	10.6 a	11.1 ac
LQ1 x CML354	23 g	26 cd	duro	duro	9.9 ad	8.9 g
Tsíri Puma	21gh	23 de	duro	duro	10.1 ad	9.5 fg
LQ5 x CML 352	21 gh	38 ab	duro	duro	9.9 ad	10.0 df
LQ5 x CML 354	20 gi	16 f	duro	duro	9.4 ae	10.3 bf
LQ2 x CML173	18 hj	24 de	duro	duro	9.9 ad	10.7 be
LQ2 x CML354	18 hj	27 cd	duro	duro	9.1 de	11.9 a
H 53 AE	18 hj	16 f	duro	duro	8.3 e	9.9 eg
LQ5 x CML 173	18hj	20 ef	duro	duro	9.2 ce	9.7 eg
LQ1 x CML173	17 ij	20 ef	duro	duro	9.7 ad	9.9 dg
LQ2 x CML352	15 j	16 f	duro	duro	9.3 be	10.4 bf
DSH	3.98	4.38			1.23	1.09

La comparación de medias se hizo entre pares de columnas (2 vs.3 , 6 vs. 7). Medias con letra diferente en cada par de columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). Textura: muy duro (0-12); duro (13-36); intermedio (38-62). DSH=Diferencia significativa honesta. ♦ Means were compared between pairs of columns (2 vs. 3, 6 vs. 7). Means in each pair of columns with different letters indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$). Texture: very hard (0-12); hard (13-37); medium (38-62). DSH=honest significant difference.

concuera con lo señalado por Vázquez *et al.* (2014) de que el porcentaje de proteína disminuyó en los genotipos evaluados bajo riego, aunque dicho porcentaje fuera mayor en temporal. Ambos testigos presentaron valores aceptables de proteína, pero el testigo Tsíri Puma fue superior en FESC-UNAM respecto a H-53 AE (Cuadro 4).

Calidad proteínica

De acuerdo con Twumasi *et al.* (2016), para que un maíz se considere como QPM debe tener niveles de los aminoácidos esenciales, lisina y triptófano, superiores a 0.35 y 0.072 g 100 g⁻¹, respectivamente. Los contenidos en las cruza investigadas mostraron que solo 22% de los materiales alcanzaron los contenidos para considerarlos maíces de calidad proteínica (Cuadro 5). Este resultado se atribuye a la interacción

growing around the experiment. In this respect Vivek *et al.* (2008) mentioned that the proportion of normal pollen to QPM pollen that pollinates QPM is 4:1, so that growers can expect that at least 25% of their grain is QPM, as occurred in our study.

Pollen exchange among the study materials was evident. The hybrid H-53 AE showed higher values than those reported for non-QPM (<3.2% lysine and <0.65% tryptophan), (Twumasi *et al.* 2016). This result could have been caused by the genes of this hybrid that interacted with the genes of the QPM genotypes. Vivek *et al.* (2008) mentioned that if a row of QPM is planted next to a non-QPM variety, regardless, 50% of the grain produced will have high lysine and tryptophan contents because the non-QPM pollen competes more or less equally with the QPM pollen to pollinate the QPM variety.

Cuadro 5. Calidad proteínica del grano de genotipos con porcentajes altos de lisina y triptófano, en dos ambientes de evaluación. Ciclo primavera-verano 2014.

Table 5. Protein quality of grain of genotypes with higher percentages of lysine and tryptophan in two environments evaluated. Spring summer cycle 2014.

Genotipo	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX
	% Triptófano		% Lisina		Índice de calidad de proteína	
LQ3 x CML354	0.59 c	0.79 b	2.82 c	3.55 b	0.59 b	0.79 bc
LQ2 x CML352	0.64 bc	0.78 bc	3.03 bc	3.39 b	0.68 b	0.73 bc
LQ1 x CML354	0.66 bc	0.88 a	3.04 bc	3.84 a	0.66 b	0.99 a
H 53 AE	0.71 ab	0.76 bc	3.47 a	3.5 b	0.85 a	0.77 bc
LQ5 x CML 354	0.78 a	0.74 c	3.22 ab	3.07 c	0.83 a	0.71 c
DSH	0.092	0.05	0.27	0.19	0.10	0.08

La comparación de medias se hizo entre pares de columnas (2vs3, 4vs5, 6vs7). Medias con diferente letra en cada par de columnas son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq .05$). DSH = Diferencia significativa honesta. ♦ Means were compared between pairs of columns (2 vs.3, 4 vs. 5, 6 vs. 7). Means in each pair of columns with different letters indicate statistical difference (Tukey; $p \leq 0.05$). DSH=honest significant difference.

del polen de las cruza, con el de plantas que no eran QPM, las cuales estuvieron ubicadas alrededor del experimento. Al respecto, Vivek *et al.* (2008) indicaron que la proporción de polen normal a polen QPM que llega a polinizar el maíz QPM, es 4:1, por lo cual el productor puede esperar que por lo menos 25% de su grano sea QPM, como ocurrió en esta investigación.

El intercambio de polen entre los materiales de estudio fue evidente. El híbrido H-53 AE mostró valores superiores a lo reportado para maíces no QPM (<3.2 % de lisina y <0.65 % de triptófano), (Twumasi *et al.* 2016). Este resultado podría deberse a que los genes de este híbrido interactuaron con los genes de genotipos QPM. Vivek *et al.* (2008) mencionaron que si se siembra una hilera de maíz QPM junto a una variedad que no lo es, 50% del grano producido de todas formas tendrá un contenido alto de lisina y triptófano porque el polen que no es QPM compite en forma más o menos igualitaria con el polen QPM para polinizar la variedad QPM.

La cruza LQ5 x CML354 presentó valores cercanos con lo reportado por Vázquez *et al.* (2013) y Twumasi *et al.* (2016) (% triptófano: 0.76-0.87; >0.8; y % de lisina: 3.38-3.94; >4.0, respectivamente) para que se pueda considerar como un maíz QPM.

Sí la guía es el índice de calidad de proteína para discernir sobre cuales maíces son QPM, se podría mencionar que el testigo H 53 AE es un genotipo QPM (al tomar en cuenta que el índice de calidad

The cross LQ5 x CML354 had values close to those reported by Vázquez *et al.* (2013) and Twumasi *et al.* (2016) (% tryptophan: 0.76-0.87, >0.8; % lysine: 3.38-3.94, >4.0, respectively) to be considered QPM.

If the protein quality index is used as a guide to discern what maize is QPM, we could mention that the H 53AE control is a QPM genotype (considering that the quality index for non-QPM materials presents values of 0.6 to 0.7). Because of this, the criterion used to categorize the single crosses by their protein quality is relative (Gutiérrez *et al.*, 2014). The interaction of the alleles involved in protein quality is a function of the gene action that is generated between them, of how transcription of the trait occurs and of the genetic diversity of the lines (Schön *et al.*, 2010). Expression of protein quality is complex, therefore explaining why not all the crosses were outstanding.

The levels of lysine and tryptophan should be monitored while generating new genotypes, and this is important to point it out because a material with the genotype *o2o2* with lysine and tryptophan levels equal to those of normal endosperm maize may or may not be obtained. For this reason, evaluation of crosses outstanding in lysine and tryptophan content in this study should continue under conditions of total isolation to determine whether they can be denominated QPM.

This type of evaluation allowed discriminating more efficiently the best genotypes, not only for

para materiales no QPM, presenta valores de 0.6 a 0.7). Por esta razón, el criterio utilizado para catalogar a las cruas simples por su calidad proteínica es relativo (Gutiérrez *et al.*, 2014). La interacción de los alelos involucrados en la calidad proteínica está en función de la acción génica que se genere entre ellos, y de cómo ocurra la transcripción de la característica y de la diversidad genética de las líneas (Schön *et al.*, 2010). La expresión de la calidad proteínica es compleja y, por tanto, esto puede explicar por qué no todas las cruas destacaron.

Los niveles de lisina y triptófano deben monitorearse mientras se generan genotipos nuevos y es importante señalarlo, porque se puede o no obtener un material con el genotipo *o2o2* con niveles de lisina y triptófano iguales a los del maíz de endospermo normal. Por ello, la evaluación de cruas sobresalientes en lisina y triptófano de este estudio debería seguir, bajo condiciones de aislamiento total, para comprobar si se pueden denominar QPM.

Este tipo de evaluaciones permitió discriminar de manera más eficiente los genotipos mejores, no solo por su rendimiento sino también por calidad nutricional. La calidad de la materia prima debe enfatizarse, y tener en consideración que con rendimiento menor se pueden obtener granos más nutritivos; por tanto, se debe pensar en un equilibrio entre el rendimiento y la calidad.

CONCLUSIONES

La interacción genotipo-ambiente permitió identificar los genotipos mejores en cada ambiente por su rendimiento, calidad comercial y calidad de proteína. Las cruas más productivas también fueron las de calidad comercial mejor, aunque la calidad de proteína fue baja. Los híbridos del CEVAMEX fueron menos productivos, aunque mostraron porcentaje de proteína mayor y calidad nutricional mejor.

Los genotipos de grano pequeño (72%) predominaron y solo cinco cruas presentaron granos de tamaño mediano y cumplieron con las especificaciones de la norma NMX-FF-034/1-SCFI-2002, para maíces destinados al proceso de nixtamalización.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT: IT201618,

their yield but also for their nutritional quality. It is necessary to emphasize the quality of the raw material and to consider that with lower yields it is possible to obtain more nutritious grain. Therefore, a balance between yield and quality should be considered.

CONCLUSIONS

The study of the interaction genotype-environment allowed identification of the best genotypes in each environment by their yield, commercial quality and protein quality. The most productive crosses were also those of better commercial quality, although protein quality was low. The CEVAMEX hybrids were less productive, although they had higher percentages of protein and better nutritional quality.

The small-grained genotypes predominated (72%), and only five crosses had medium-sized grain and met the specifications of the norm NMX-FF-034/1-SCFI-2002 for maize destined to lime water softening process.

—End of the English version—

---*---

UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan, km 2.5. Cuautitlán Izcalli, estado de México. CP. 54714. AP. 25. Tel. 01 55 56231971.

LITERATURA CITADA

- AACC (American Association of Cereal Chemistry). 2000. Approved Methods of the AACC, 16th. The Association: St. Paul, MN. USA. 1200 p.
- Billeb S., A. C., and R. Bressani. 2001. Características de cocción por nixtamalización de once variedades de maíz. Arch. Latinoam. Nutr. 51: 86-94.
- Canales I., E., R. Tadeo M., J. Mejía C., J. García Z., y A. Espinosa C. 2017. Semilla fértil y androestéril de maíz bajo diferentes densidades de población. Ecosist. Rec. Agropec. 4: 465-473.
- CNVV (Catálogo Nacional de Variedades Vegetales). 2018. Tercer trimestre. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. México, Ciudad de México. 42 p.
- Coutiño E., B., G. Vázquez C., y D. Rincón E. 2018. V56AC, primera variedad de maíz (*Zea mays* L.) olotón QPM para los Altos de Chiapas. Acta Fitogenética. 5: 62.

- Coutiño E., B., y G. Vázquez C. 2018. V238AC: nueva variedad de maíz de grano amarillo QPM. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9: 1089-1092.
- Dei, H. K. 2017. Assessment of maize (*Zea mays* L.) as feed resource for poultry. *Poultry Sci.* InTech. pp: 1-32. <https://www.intechopen.com/books/poultry-science/assessment-of-maize-zea-mays-as-feed-resource-for-poultry>. (Consulta: junio 2016).
- Espinosa C., A., N. Gómez M., M. Sierra M., F. Caballero H., B. Coutiño E., A. Palafox C., F. Rodríguez M., A. García B., C. Cano, y E. Betanzos M. 2005. Variedades e híbridos de maíz de calidad proteínica en México, *Rev. Cienc. Desarrollo. CONACYT. México.* 10 p. <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/component/content/article/7/22-variedades-e-hibridos-de-maiz-de-calidad-proteinica-en-mexico.html>. (Consulta: mayo 2016).
- FIRA. 2015. Panorama agroalimentario. Dirección de investigación y evaluación económica y sectorial. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61952/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2015.pdf. (Consulta: abril 2016).
- Gutiérrez H., G. F., J. L. Arellano V., M. Vázquez R. J., E. García R., P. Vázquez L., y E. Flores G. 2014. Formación de híbridos de maíz con calidad proteica: lisina, triptófano e índice de calidad. *Rev. Fac. Agron.* 31: 171-189.
- López L., C., M. Tadeo R., A. Espinosa C., J. García Z., I. Benítez R., M. Vázquez C., y J. Carrillo S. 2017. Productividad de cruza simples de maíz con calidad de proteína en Valles Altos de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8: 559-570.
- Mittelman A., F. Miranda J., B., M. Mello G., J., L. Hara C., K. Takao R., T. 2003. Potential of the ESA23B maize population for protein and oil content improvement. *Scientia Agrícola.* 60: 319-327.
- Noriega G., L., A. E. Preciado O., R., E. Andrio E., A. Terrón I., y J. Covarrubias P. 2011. Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2: 489-500.
- Nurit E., A. Tiessen, V. Pixley K., and N. Palacios R. 2009. Reliable and inexpensive colorimetric method for determining protein-bound tryptophan in maize kernels. *J. Agric. Food Chem.* 57: 7233-7238.
- Nuss E. T., and A. Tanumihardjo S. 2011. Quality protein maize for Africa: Closing the protein inadequacy gap in vulnerable populations. *Adv. Nutr.* 2: 217-224.
- Sahagún J. 1998. Evaluaciones genotípicas en series de experimentos. *Germen* N°. 14. Sociedad Mexicana de Fitogenética 40 p.
- Sala R., G., F. Andrade H., and M. Westgate E. 2007. Maize kernel moisture at physiological maturity as affected by source-sink relationship during grain filling. *Crop Sci.* 47: 709-714.
- SAS Institute Inc. 2002. *Statistical Analysis System User's Guide.* SAS Institute. Cary, USA. 956 p.
- SE (Secretaría de Economía). 2002. NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano Cereales—Parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado—Especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas. México, D. F. 18 p.
- Schön C., C., S. Dhillon B., F. Utz H., and E. Melchinger A. 2010. High congruency of QTL positions for heterosis of grain yield in three crosses of maize. *Theor. Appl. Genet.* 120: 321-332.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2017. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Consulta: junio 2017)
- Tsai C., Y., A. Dalby, and A. Jones R. 1975. Lysine and tryptophan increase during germination of maize seed. *Cereal Chem.* 52: 356-360.
- Twumasi A. S., N. Palacios R., D. Friesen, A. Teklewold, D. Wegary, H. De Groote, and M. Prasanna, B. 2016. Guidelines for the quality control of quality protein maize (QPM) seed and grain. CIMMYT: Addis Ababa, Ethiopia. 45 p
- Vasal S., K., E. Villegas, M. Bjarnason, B. Gelaw, and P. Goerts. 1980. Genetic modifiers and breeding strategies in developing hard endosperm Opaque-2 materials. *In: Pollmer, W. G., and R. H. Phipps (eds). Improvement of Quality Traits of Maize for Grain and Silage Use.* Martinus Mijhoff Publishers. Amsterdam, Holland. pp: 37-73.
- Vázquez C., M. G., L. Arellano V., J., y D. Santiago R. 2014. Rendimiento y calidad de grano y tortilla de maíces híbridos de Valles Altos de México crecidos en riego y temporal. *Rev. Fitotec. Mex.* 38: 75-83.
- Vázquez C., M. G., H. Mejía A., Y. Salinas M., y D. Santiago R. 2013. Efecto de la densidad de población en la calidad del grano, nixtamal y tortilla de híbridos de maíz de alta calidad proteínica. *Rev. Fitotec. Mex.* 36: 225 – 232.
- Vázquez C., M. G., H. Mejía A., C. Tut C., y N. Gómez M. O. 2012. Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos centrales de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 23-31.
- Villegas E., E. Ortega, y E. Bauer. 1984. Métodos químicos usados en el CIMMYT para determinar la calidad de proteína de los cereales. México, D.F.: CIMMYT. 29 p.
- Vivek B., S., F. Krivanek A., N. Palacios R., S. Twumasi A., y O. Diallo A. 2008. Mejoramiento de maíz con calidad de proteína (QPM): Protocolos para generar variedades QPM. México, D.F.: CIMMYT. 56 p.