



SELECCIÓN DE FAMILIAS DE MAÍZ NATIVO PARA COLOR DE GRANO AMARILLO: CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS Y CAROTENOIDES

SELECTION OF NATIVE MAIZE FAMILIES FOR YELLOW GRAIN COLOR: AGRONOMIC TRAITS AND CAROTENOIDS

Rosemberg Hernández-Ruiz¹, Francisco Javier Sánchez-Ramírez¹,
Froylán Rincón-Sánchez¹ y Norma Angélica Ruiz-Torres²

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Departamento de Fitomejoramiento, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. ²UAAAN, Centro de Capacitación y Desarrollo de Tecnología en Semillas. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Autor de correspondencia (frajavsanram@gmail.com)

RESUMEN

Entre la amplia diversidad del maíz, el grano amarillo-anaranjado ha sido reconocido como fuente de carotenoides, incluida la provitamina A, los cuales son benéficos para la salud humana; no obstante, para la mejora de la concentración, la cuantificación en cada progenie es una limitante; por lo tanto, se planteó la selección visual para color de grano amarillo como método indirecto. Para conocer el efecto, se evaluaron las características agronómicas y la concentración de carotenoides en dos generaciones de familias de hermanos completos (FHC) en maíz amarillo nativo de Coahuila, México. El estudio se realizó con 18 accesiones de cinco grupos raciales (Ratón, Tuxpeño, Tuxpeño Norteño, Cónico Norteño y Celaya) y la evaluación agronómica se hizo en tres localidades de la región sureste de Coahuila: Buenavista, Saltillo; Galeana, Nuevo León y General Cepeda. Con las ocho FHC sobresalientes para color de grano se determinó el contenido de carotenoides y provitamina A. La selección afectó significativamente ($P \leq 0.05$) el rendimiento (entre -0.30 y 0.90 t ha^{-1}), la floración (entre -8.9 y 6.5 días) y la altura de la planta (entre -26.2 y 30.3 cm). Las concentraciones máximas de carotenoides en $\mu\text{g g}^{-1}$ fueron: 1.58 luteína (LUT), 2.02 zeaxantina (ZEAX), 2.28 criptoxantina (CRYPT), 0.56 13-cis β -caroteno (13 βC), 1.45 β -caroteno (βCAR), 0.97 9-cis β -caroteno (9 βC), 4.13 provitamina A (PROA) y 10.19 carotenoides totales (TOTAL). Se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre familias para la concentración de carotenoides; el TOTAL fue modificado en cada accesión entre -0.46 y $1.94 \mu\text{g g}^{-1}$, PROA entre -0.38 y $0.85 \mu\text{g g}^{-1}$ y CRYPT entre 0.24 y $0.91 \mu\text{g g}^{-1}$. La selección visual del color de grano amarillo permitió modificar el contenido de provitamina A en el maíz nativo; no obstante, este aumento fue reducido considerando las necesidades alimenticias humanas.

Palabras clave: *Zea mays* L., calidad del grano, maíz amarillo, mejoramiento, nutraceutico.

SUMMARY

Among the wide diversity of maize, the yellow-orange grain has been recognized as a source of carotenoids, including provitamin A, which are beneficial to human health; however, for the improvement of concentration, quantification in each progeny is a limiting factor; therefore, visual selection for yellow grain color was proposed as an indirect method. To determine this effect, agronomic characteristics and carotenoid concentration were evaluated in two generations of full-sib families (FSF) in yellow maize native to Coahuila, Mexico. The study was conducted with 18 accessions of five racial groups (Ratón, Tuxpeño, Tuxpeño Norteño, Cónico Norteño and Celaya), and

the agronomic evaluation was conducted in three locations of Southeastern region of Coahuila: Buenavista, Saltillo; Galeana, Nuevo Leon; and General Cepeda. With the eight outstanding FSF for grain color, the content of carotenoid and provitamin A was determined. Selection significantly affected ($P \leq 0.05$) yield (between -0.30 and 0.90 t ha^{-1}), flowering (between -8.9 and 6.5 days) and plant height (between -26.2 and 30.3 cm). The maximum carotenoid concentrations in $\mu\text{g g}^{-1}$ were: 1.58 lutein (LUT), 2.02 zeaxanthin (ZEAX), 2.28 cryptoxanthin (CRYPT), 0.56 13-cis β -carotene (13 βC), 1.45 β -carotene (βCAR), 0.97 9-cis β -carotene (9 βC), 4.13 provitamin A (PROA) and 10.19 total carotenoids (TOTAL). Significant differences ($P \leq 0.05$) were observed between families for carotenoid concentrations; the TOTAL was modified in each accession between -0.46 and $1.94 \mu\text{g g}^{-1}$, PROA between -0.38 and $0.85 \mu\text{g g}^{-1}$ and CRYPT between 0.24 and $0.91 \mu\text{g g}^{-1}$. The visual selection of yellow grain color allowed to modify the provitamin A content in native maize; however, this increase was reduced considering human nutritional needs.

Index words: *Zea mays* L., breeding, kernel quality, nutraceutical, yellow maize.

INTRODUCCIÓN

El maíz es un importante insumo para elaborar alimentos para consumo humano y animal. Entre la diversidad de la especie, el maíz amarillo-anaranjado ha sido reconocido como fuente de carotenoides (Sagare *et al.*, 2018); estos antioxidantes, benéficos para la salud humana, promueven el bienestar ocular y disminuyen el riesgo de cáncer, diabetes y aterosclerosis (Khamkoh *et al.*, 2019). Los carotenoides en maíz incluyen dos carotenos (α -caroteno y β -caroteno) y tres xantofilas (β -criptoxantina, zeaxantina y luteína), aunque la fracción de los carotenoides con propiedades provitamina A (α -caroteno, β -caroteno y β -criptoxantina) es menor comparada con zeaxantina y luteína (Sagare *et al.*, 2018).

La concentración de carotenoides en maíz ha mostrado variación. Ortiz-Monasterio *et al.* (2007), Suwarmo *et al.* (2014) y Menkir *et al.* (2015) reportaron concentraciones de provitamina A entre 0.24 y 8.80, entre 2.34 y 22.25, y

entre 0.01 y 17.4 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente; estos intervalos muestran la diversidad, el potencial de aprovechamiento y la posibilidad de mejora para esta característica. Además, con base en las necesidades y la bioconversión del maíz a vitamina A en humanos, se definió que 15 $\mu\text{g g}^{-1}$ de provitamina A es el mínimo requerido para consumo humano (Menkir *et al.*, 2021).

En el mejoramiento del maíz para contenido de carotenoides, el primer paso es conocer la variabilidad existente en el germoplasma local (Khamkoh *et al.*, 2019) y los componentes genéticos de la característica. En este sentido, Muthusamy *et al.* (2015) encontraron que la acumulación de este pigmento es de herencia cuantitativa y de alta heredabilidad; además, Senete *et al.* (2011) encontraron que la composición y el contenido de carotenoides está controlado por efectos aditivos; esto indicó que es posible la mejora convencional a través de selección recurrente (Khamkoh *et al.*, 2019; Senete *et al.*, 2011; Suwarno *et al.*, 2014). En este contexto, Dhliwayo *et al.* (2014), mediante selección recurrente de familias S_1 encontraron incrementos de 18 a 70 %, de 28 a 60 % y de 25 a 67 % en el contenido de β -criptoxantina, β -caroteno y provitamina A, respectivamente. El incremento en los carotenoides por selección ha sido eficaz una vez que los genes asociados con éstos fueron integrados a los progenitores recurrentes a través de retrocruzamiento (Khamkoh *et al.*, 2019; Suwarno *et al.*, 2014).

De acuerdo con Domínguez-Hernández *et al.* (2022), el contenido total de carotenoides en maíz corresponde con la intensidad del color en el endospermo; las razas con endospermo blanco poseen la menor concentración ($\leq 10 \mu\text{g g}^{-1}$), los blanco-cremosos y amarillo pálidos tienen concentración intermedia (entre 14.4 y 21.8 $\mu\text{g g}^{-1}$) y los anaranjados la mayor concentración. Por lo anterior, se ha sugerido la selección visual para color de grano; sin embargo, Muthusamy *et al.* (2015) encontraron que no es un método confiable para seleccionar concentraciones mayores de provitamina A, pero Menkir *et al.* (2015), al combinar el retrocruzamiento con la selección visual para color de grano amarillo-anaranjado brillante, lograron incrementar de 23 a 313 % el β -caroteno, y de 32 a 190 % la provitamina A en comparación con los progenitores recurrentes.

En maíces nativos amarillos, Lozano-Alejo *et al.* (2007) reportaron concentraciones de provitamina A en grano de hasta 3.05 $\mu\text{g g}^{-1}$ en una población de Comitán, Chiapas, México, y de 1.25 y 1.05 $\mu\text{g g}^{-1}$ para Mazateca, Oaxaca y Acatzingo, Puebla, México respectivamente. Por otra parte, en una variedad formada a partir de poblaciones amarillas de la raza Comiteco, Coutiño *et al.* (2008) encontraron en el grano una concentración de β -criptoxantina y

β -caroteno de 4.1 y 5.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ y de 14.3 $\mu\text{g g}^{-1}$ de luteína, aunque después del proceso industrial para producción de botanas, la β -criptoxantina y el β -caroteno redujeron en al menos 60 % su concentración.

Con base en lo anterior y para mejorar la concentración de carotenoides, particularmente de provitamina A en maíz amarillo nativo de Coahuila, México, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la selección visual sobre características agronómicas, color de grano amarillo y contenido de carotenoides en dos generaciones de familias de hermanos completos obtenidas a partir de accesiones de maíz amarillo nativo de Coahuila, México en dos ciclos de selección, bajo el supuesto de que la selección visual sobre el color del grano incrementa el contenido de carotenoides, particularmente provitamina A, mientras que las características agronómicas no son alteradas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Entre la diversidad del maíz nativo de Coahuila, las accesiones mostraron semillas de un color (blanco, amarillo, azul y rojo) o mezclas de colores (pintos) predominando blanco-amarillo y blanco-azul. Aquellas que presentaron granos amarillos y los pintos con al menos 15 % de semillas amarillas fueron seleccionadas y usadas para el estudio y la mejora del contenido de carotenoides (Cuadro 1).

Generaciones de familias de hermanos completos

En el ciclo agrícola 2019 se estableció un lote de polinización controlada en el Ejido El Mezquite, Galeana, Nuevo León, México. Se preparó el terreno con barbecho, rastra y surcado, y se sembraron las semillas amarillas obtenidas de cada accesión del Centro de Conservación de Semillas Ortodoxas Región Norte de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) bajo condiciones de riego presurizado. Se utilizó una densidad de 50,000 plantas ha^{-1} y una dosis de fertilización de 120N-60P-60K; se aplicó 60N-60P-60K a la siembra con triple 17 y el resto en la escarda con urea. Durante la floración se realizaron 40 autopolinizaciones para fijar el color amarillo en el grano, obteniéndose entre 15 y 25 mazorcas por cada accesión; asimismo, en 2020 y en 2021 se establecieron en el Campo Experimental El Bajío de la UAAAN, ubicado en Saltillo, Coahuila, México dos lotes de polinización controlada bajo las mismas condiciones que el anterior. En el primero se realizaron polinizaciones planta a planta obteniéndose al menos 20 familias de hermanos completos (FHC) de cada accesión, y en el segundo, se derivaron nuevamente FHC y se obtuvieron las 10 mejores familias por color de grano amarillo.

Cuadro 1. Accesiones de maíz nativo con grano amarillo, grupo racial y área de adaptación usadas para el estudio y mejoramiento del contenido de carotenoides.

Grupo racial	Accesiones estudiadas [†]	Área de adaptación [‡]
Ratón	COAH077 ^{††} , COAH217, COAH223, COAH226 ^{††} , COAH227, COAH238,	Baja, intermedia
Tuxpeño	COAH068, COAH078, COAH083, COAH089, COAH177 ^{††} , COAH182, COAH213 ^{††} , COAH215	Baja, intermedia
Tuxpeño Norteño	COAH069 ^{††} , COAH178 ^{††}	Baja, intermedia
Celaya	COAH075 ^{††}	Intermedia
Cónico Norteño	COAH003 ^{††}	Altura, transición

[†]Accesiones a partir de las cuales se desarrollaron las dos generaciones de familias de hermanos completos. ^{††}Accesiones estudiadas en la determinación del contenido de carotenoides. [‡]Altitud: > 2000 metros sobre el nivel del mar (msnm), Transición: 1801-2000 msnm, Intermedio: 1001-1800 msnm, Baja: 0-1000 msnm.

En los tres ciclos agrícolas, al momento de cosecha se seleccionaron de forma visual mazorcas con grano amarillo homogéneo y brillante, y morfológicamente acordes con su grupo racial. Las mazorcas seleccionadas fueron desgranadas y la semilla de cada familia mezclada.

En la comparación visual de las FHC de la primera y la segunda generación se observaron diferencias en el color del grano a favor del ciclo posterior. Con las FHC de la segunda generación de mayor coloración visual amarilla y su respectiva FHC de la primera generación se realizaron las pruebas para contenido de carotenoides, considerando evaluar si la diferencia en el color de grano se asociaba con el cambio en el contenido de carotenoides.

Evaluación agronómica

La evaluación agronómica de las generaciones de FHC se realizó en el ciclo P-V 2022 en tres localidades del sureste de Coahuila, México con características contrastantes en altura sobre el nivel del mar, y por lo tanto, de temperatura (Cuadro 2).

La preparación del suelo, siembra y manejo agronómico del cultivo se llevó a cabo de igual manera que en la generación de FHC. La evaluación de las generaciones de FHC se estableció en un diseño experimental de bloques incompletos con arreglo α -látxice con dos repeticiones en cada sitio experimental. La unidad experimental consistió de un surco de 4 m de longitud y 0.80 m de ancho. Las variables agronómicas registradas fueron:

Rendimiento de grano (RTO). Se obtuvo con la fórmula

$$RTO = \frac{PC \times \%HUM \times \%DESG \times FC}{8500}$$

Donde: PC: peso de campo de mazorca por parcela en kg, %HUM: porcentaje de humedad determinado mediante el método de la estufa, %DESG: proporción de la mazorca que representa el grano, FC: factor de corrección obtenido de dividir 10,000 m² entre la superficie útil de la parcela experimental (3.2 m²), 8500: valor constante que permite estimar el rendimiento con 15 % de humedad que es el valor manejado para la comercialización de semillas a nivel regional.

Días a floración masculina (DFM). Se registró para cada parcela mediante la cuantificación del número de días desde el primer riego después de la siembra hasta que el 50 + 1 % de las plantas se encontraron en antesis.

Altura de la planta (ALPTA). Se determinó como la longitud de la planta en cm, desde el nivel del suelo hasta la inserción de la hoja bandera.

Diferencia entre generaciones (DIF). Para conocer el efecto de la selección visual sobre las características agronómicas se obtuvo la diferencia entre la expresión agronómica de la segunda generación menos la expresión de la primera generación para RTO, DFM y ALPTA.

Concentración de carotenoides en dos generaciones de FHC bajo selección visual para color de grano

De la semilla obtenida de las FHC seleccionadas por coloración de grano amarillo, de la segunda generación de selección y aquella que dio origen a ésta, se obtuvo una muestra de 180 granos de cada versión para cada población. De la muestra obtenida se seleccionó una submuestra de 50 granos libres de pudriciones y daños físicos, que fue triturada en un molino de ciclón 1093 con un tamaño de partícula superior a 0.10 mm y después en un segundo molino (Cyclotec 1093, Foss, Hillerød,

Cuadro 2. Localización geográfica y condiciones agroecológicas de las localidades de evaluación†.

Coordenadas y elementos del clima	El Mezquite, Galeana, Nuevo León	Buenavista, Saltillo, Coahuila	General Cepeda, Coahuila
Latitud	25° 05' 22" N	25° 23' 36" N	25° 23' 00.91" N
Longitud	100° 42' 31" O	101° 00' 02" O	101° 27' 15.3" O
Altitud (msnm)	1910	1740	1457
Temperatura media anual (°C)	16.3	17.4	18.4
Precipitación media anual (mm)	414.6	390	372.8

†SMN (2025).

Dinamarca) obteniéndose una partícula de 0.5 mm. De la harina obtenida, se extrajeron 600 mg por muestra para la extracción de carotenos según el método descrito por Palacios-Rojas (2018), que incluye: curva de calibración, preparación de los estándares, preparación del estándar de recuperación (apocaroteno) y la extracción y cuantificación de los carotenos luteína (LUT), zeaxantina (ZEAX), criptoxantina (CRYPT), 13-cis β-caroteno (13βC), β-caroteno (βCAR), 9-cis β-caroteno (9βC), provitamina A (PROA) y carotenoides totales (TOTAL). Se usaron dos testigos de referencia: IMIC-100 y CML-297, líneas con alta concentración de provitamina A desarrolladas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Calidad Nutricional de Maíz “Evangeline Villegas” en el CIMMYT. Finalmente, se calculó la diferencia entre generaciones para carotenoides (DIFC) restando el contenido de los carotenoides de la segunda generación menos la primera.

Análisis estadístico

A las variables agronómicas y contenido de carotenoides se les realizó análisis de varianza; para las primeras, en la comparación de medias se utilizó un criterio de selección determinado por la media más una y dos veces el error estándar de la media ($\mu + E.E. = y \mu + E.E. =$), y en el segundo se usó la prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Para las diferencias entre generaciones, tanto para las características agronómicas (DIF) como para el contenido de carotenoides (DIFC) se empleó una prueba de *t* para muestras apareadas. Estos análisis se realizaron con ayuda del software Statistical Analysis System (SAS Institute, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características agronómicas de familias de hermanos completos

El análisis de varianza combinado (Cuadro 3) mostró

diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre Localidades, Accesiones y Generaciones para RTO, DFM y ALPTA; situación similar se observó en la interacción Localidad × Accesión. Las interacciones Localidad × Generación y Accesión × Generación solo fueron significativas ($P \leq 0.05$) para RTO y DFM, no así para la interacción Loc × Acc × Gener, que solo fue significativa ($P \leq 0.05$) para RTO, contrastando con Repeticiones/Localidad, y BI/Localidad × Repetición donde solo en RTO no hubo significancia ($P > 0.05$).

Los sitios de evaluación (Localidades) son representativos de las condiciones agroambientales del sureste de Coahuila, México y las diferencias ambientales asociadas con la altitud (Cuadro 2) provocaron diferencias significativas en el RTO, DFM y ALPTA. Espinosa *et al.* (2019), en una evaluación regional similar, encontraron que la floración masculina es más susceptible a las diferencias ambientales que el rendimiento de grano.

Las diferencias entre accesiones, se asoció con el origen ecológico y racial de las poblaciones, donde Ratón y Tuxpeño son razas predominantes en áreas intermedias y bajas, mientras que Cónico Norteño está adaptado a zonas de transición y altura; por lo tanto, al ser evaluadas en al menos un sitio diferente a su nicho ecológico su expresión fue modificada (Espinosa *et al.*, 2019). Situación similar se observó entre Generaciones de FHC (Cuadro 3). Esto se asoció con el efecto de la selección visual por color de grano amarillo homogéneo y brillante y la polinización controlada, que favorecieron que en la generación avanzada expresara un comportamiento superior a la previa (Ballesteros *et al.*, 2019).

La interacción Localidad × Accesión se esperaba, toda vez que la interacción genotipo × ambiente es un fenómeno generalizado cuando se evalúan genotipos adaptados a una condición específica, de diferente origen ecológico en sitios diferentes. Con base en ello, algunas accesiones (e.g. COAH068, COAH077, COAH078, COAH213 y COAH215)

Cuadro 3. Cuadrados medios y probabilidad para características agronómicas en dos generaciones de selección para color de grano amarillo en accesiones de maíz nativo evaluadas en la región sureste de Coahuila, México.

FV	GL	RTO	DFM	ALPTA
Localidad (Loc)	2	48.62 **	21,012.01 **	24,980.29 **
Repetición/Localidad	3	1.65	21.41 *	972.93 *
Bl/Localidad × Repetición	18	2.82	50.53 **	783.01 **
Accesión (Acc)	35	6.92 **	64.41 **	2770.92 *
Generación (Gener)	1	0.91 *	19.37 *	1641.11 *
Localidad × Accesión	70	3.98 **	30.34 **	1125.31 **
Localidad × Generación	2	13.24 **	37.65 **	229.32
Accesión × Generación	35	2.75 *	14.26 *	268.62
Loc × Acc × Gener	70	3.78 **	10.45	306.23
Error	196	1.81	7.54	307.02
CV (%)		25.70	3.75	10.6
R ²		0.89	0.97	0.90
Media		5.60	78.94	174.16

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, Bl: bloque, CV: coeficiente de variación, RTO: rendimiento de grano, DFM: días a floración masculina, ALPTA: altura de la planta, *, **: significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

mostraron un comportamiento diferencial al resto en al menos una localidad para alguna característica agronómica (Cuadro 4). Este mismo efecto puede explicarse para la interacción Localidad × Generación, donde en general las características como rendimiento, floración y altura de la planta son frecuentemente afectadas por el efecto ambiental (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2016).

La significancia de la interacción de Localidad × Generación indicó que una generación de FHC mostró una expresión diferente a la otra en el RTO y en DFM en al menos una localidad de evaluación. Situación similar se observó en la interacción Accesión × Generación, que mostró divergencia en RTO y DFM; es decir, la generación de al menos una población mostró expresiones contrastantes, lo que significa que la generación avanzada no superó a la anterior en cada accesión estudiada.

Entre localidades, los resultados mostraron que General Cepeda y Buenavista tuvieron mayor rendimiento promedio (6.3 t ha⁻¹), una floración precoz (65-77 días) y altura de planta promedio de 185 cm en comparación con El Mezquite (Cuadro 4). En esta última, el RTO fue menor (5.3 t ha⁻¹), el ciclo fenológico fue tardío (94 DFM) y hubo menor ALPTA (163 cm), en relación con el resto de las localidades.

Entre las Accesiones a través de las localidades (Cuadro 3) hubo una diferencia en el RTO de 6.6 t ha⁻¹, 43 días entre la floración y hasta 82 cm en la ALPTA, lo cual demostró la diversidad que existe entre las poblaciones y el efecto de las localidades de estudio. Al respecto, y bajo condiciones ambientales similares, Espinosa *et al.* (2019) encontraron un intervalo de variación superior para el RTO, de 3.68 a 11.3 t ha⁻¹.

Entre las Accesiones, COAH077, COAH068 y COAH083 de los grupos raciales Ratón y Tuxpeño adaptados a áreas ecológicas bajas e intermedias fueron superiores para RTO (≥ 5.9 t ha⁻¹) en cada localidad; las accesiones con RTO sobresaliente (≥ 4.6 t ha⁻¹) en al menos dos sitios fueron COAH238, COAH223, COAH213, COAH215 (Cuadro 4). Las accesiones sobresalientes para RTO, a través de los sitios de evaluación fueron los grupos raciales, razas que predominan en el estado de Coahuila debido a su capacidad de adaptación a condiciones adversas de producción, razón por la cual los productores las siguen cultivando. Al respecto, Nájera *et al.* (2010), al evaluar poblaciones nativas de Coahuila, reportaron que Ratón y Tuxpeño sobresalieron con hasta 11.0 t ha⁻¹.

Para DFM los intervalos fueron de 86 a 105 d en El Mezquite, de 74 a 83 d en Buenavista y de 62 a 70 d en General Cepeda; la variación encontrada fue menor a la reportada por Nájera *et al.* (2010), donde encontraron diferencias de 25 días en un sitio intermedio y hasta 50 días en transición. A través de las localidades, solo la accesión COAH177 mantuvo un ciclo prolongado en cada sitio; mientras que el 95 % de las poblaciones mostraron DFM acorde con las condiciones de la localidad de evaluación; es decir, ciclo tardío en El Mezquite, intermedio en Buenavista y precoz en General Cepeda, lo cual se asoció directamente con las diferencias térmicas entre las localidades, mismas que están definidas por su altitud (Cuadro 2).

La ALPTA no mostró relación con el RTO, pero sí con DFM, donde las plantas de mayor altura (≥ 190 cm) tuvieron un ciclo más prolongado en cada localidad. La ALPTA en el estudio, acorde con las condiciones de producción regionales, se consideró normal; sin embargo, comparada con el estudio de Sánchez-Hernández *et al.* (2021), quienes evaluaron poblaciones nativas para la producción de forraje, la ALPTA es baja, dado que el mayor rendimiento de materia verde se obtuvo de poblaciones con $ALPTA \geq 250$ cm; no obstante, en la región de estudio, dadas las condiciones ambientales, no es común que la ALPTA supere 200 cm, lo que es un indicativo del potencial para producción de forraje.

La selección realizada de forma visual, desde las autopolinizaciones hasta la segunda generación de FHC, se dirigió hacia el color amarillo, mejorando la penetrancia y la expresividad del grano amarillo; no obstante, hubo una selección indirecta sobre las mazorcas y, por ende, para el rendimiento y la floración, razón por la cual se realizó la evaluación en campo de las dos generaciones de FHC. En las poblaciones nativas es deseable mejorar el rendimiento, y particularmente reducir los días a floración, dada la escasa y tardía precipitación, y las frecuentes heladas tempranas.

Entre las accesiones hubo variación en la respuesta a la selección. En el Cuadro 5 se muestran las diferencias de la comparación entre la primera y la segunda generación para cada accesión, donde los valores positivos indicaron ganancia, mientras que los negativos mostraron disminución. Para el caso del rendimiento, los valores positivos fueron deseables, pero para la floración no lo fueron.

Entre las accesiones, la diferencia entre las generaciones para RTO fue desde -0.30 hasta 0.90 t ha^{-1} . Los resultados mostraron que el efecto de la selección pudo ser significativo, positivo o negativo, o no significativo. En este

sentido, Díaz-Ramírez *et al.* (2020) encontraron ganancias de 0.27 y 0.62 t ha^{-1} por ciclo en la selección recurrente de familias S_1 para rendimiento de grano; sin embargo, Dhlwayo *et al.* (2014), a pesar de haber mejorado la PROA a través de la selección recurrente encontraron ganancias de 0.24 t ha^{-1} por ciclo y pérdidas entre -0.50 y -0.36 t ha^{-1} por ciclo.

Las ganancias significativas se observaron entre las familias de siete accesiones, que van desde 0.40 hasta 0.90 t ha^{-1} ; es decir, se registró un incremento en el rendimiento de la segunda generación con respecto a la primera. En dos accesiones (COAH226 y COAH178), la diferencia fue de al menos 0.8 t ha^{-1} y en las otras cinco de 0.40 a 0.55 t ha^{-1} . Por el contrario, COAH227 mostró un retroceso significativo no deseable de -0.30 t ha^{-1} , y que se asoció con la selección de mazorcas de diámetro y longitud menor. En el resto de las poblaciones los cambios en RTO no fueron significativos.

En los DFM se observaron cambios significativos en solo cinco accesiones; la variación fue desde -8.9 hasta 6.5 días, y en este caso los cambios deseables son aquellos negativos, los cuales indicaron que disminuyó el ciclo biológico en la generación avanzada, efecto deseable dada la limitada estación de crecimiento regional definida por el temporal tardío y las heladas tempranas. En este sentido, por efecto indirecto de la selección visual COAH083, COAH213 y COAH075 presentaron un ciclo biológico significativamente más corto que se asoció con el control de la polinización.

En la ALPTA, la selección provocó cambios desde -26.2 cm hasta 30.3 cm, donde es deseable mejorar la ALPTA como un indicador de la producción de forraje, pero sin incrementar la floración o reducir el rendimiento, como sucedió con COAH075 del grupo racial Celaya, donde se redujo ALPTA y DFM.

En general, a pesar de ser un efecto indirecto, existieron modificaciones significativas sobre las características agronómicas, debido al efecto de la selección para el color del grano amarillo, aunque solo en algunos casos los cambios representan una ventaja.

Efecto de la selección visual para color de grano amarillo en la concentración de carotenoides

En el Cuadro 6 se muestra la concentración de los carotenoides de las FHC en la primera generación y la diferencia (DIFC) corresponde al efecto de la selección visual en la segunda generación para cada accesión; el intervalo de variación de cada carotenoide se representó entre las FHC por el valor máximo y mínimo.

Cuadro 4. Medias de las características agronómicas de las generaciones de FHC de maíz amarillo de poblaciones nativas evaluadas en tres localidades del sur de Coahuila, México, 2022.

Grupo Racial	Accesión	El Mezquite			Buenavista			Gral. Cepeda		
		RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)
Celaya	COAH075	3.2	101 **	148	6.1	78 **	212 **	6.2	64	172
Cónico Norteño	COAH003	3.6	91	139	7.0 **	78 *	192	6.3	69 **	193 **
Ratón	COAH238	5.4	97 **	173 **	6.6 **	77	175	7.4 **	66	192 **
	COAH077	6.9 **	96 *	190 **	6.4 *	75	186	7.6 **	65	188 *
	COAH223	5.9 *	90	154	6.0	74	173	6.8 *	64	171
	COAH217	3.6	90	146	5.9	77	207 **	9.1 **	70 **	226 **
	COAH227	5.0	98 **	167	5.7	78	191	5.7	67 **	180
	COAH226	5.6 *	95	173 **	5.1	83 **	202 **	6.6	69 **	203 **
Tuxpeño	COAH182	2.5	92	130	7.1 **	77	189	6.5	66	185
	COAH068	6.4 **	95	188 **	6.7 **	78 *	190	6.7 *	64	178
	COAH083	5.9 *	105 **	193 **	6.6 **	79 **	197 **	6.9 **	62	174
	COAH089	4.0	97 **	162	6.5 **	79 **	195 *	5.6	66	177
	COAH213	6.2 **	90	133	6.3 *	75	169	4.6	62	153
	COAH177	4.9	97 **	156	6.1	78 *	199 **	6.3	67 **	168
	COAH215	7.0 **	93	177 *	5.9	79 **	179	7.6 **	69 **	196 **
Tuxpeño Norteño	COAH078	8.3 **	86	194 **	5.7	77	202 **	6.5	63	187 *
	COAH178	5.1	94	164	6.2	75	167	4.7	62	148
	COAH069	5.3	90	153	6.0	76	196 *	4.9	62	168
Media		5.3	94	163	6.2	77	190	6.4	65	181
EE		0.3	1.1	4.8	0.1	0.5	3.1	0.3	0.6	4.3

*, **: significativo con base en $\mu + EE$ y $\mu + 2EE$, respectivamente, EE: error estándar, RTO: rendimiento de grano, DFM: días a floración masculina, ALPTA: altura de planta.

Entre la diversidad del maíz nativo, estudiada a través de las generaciones de FHC de mayor coloración de grano amarillo, se encontró que el contenido de carotenoides es limitado. En el caso de LUT y ZEAX, la concentración máxima se encontró en COAH177 y representó el 60 % en comparación con CML-297. La máxima expresión de CRYPT, PROA y TOTAL representó el 23 % en COAH226, el 52 % en COAH226 y solo 38.7 % en COAH177, respectivamente, con respecto al contenido de CML-297 (Testigo); no obstante, COAH226 presentó valores similares de 13 β C (95 %) y β CAR (86 %) y superior (11.5 %)

en 9 β C con comparación con el mismo testigo. Con base en los valores máximos, las familias de dos accesiones destacaron por su contenido de carotenoides: COAH177 y COAH226, que pertenecen al grupo racial Ratón y Tuxpeño, respectivamente (Cuadro 6).

Las concentraciones encontradas entre las FHC fueron menores que las reportadas en el estudio de Ortiz-Monasterio *et al.* (2007) y con respecto a los resultados de Dhliwayo *et al.* (2014); además, el contenido de las familias es al menos 80 % menor que la meta de 15 $\mu\text{g g}^{-1}$ de

Cuadro 5. Diferencias (DIF) entre generaciones de FHC debidas al efecto de la selección visual para color de grano amarillo en las características agronómicas.

Grupo Racial	Población	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)
Celaya	COAH075	0.15	-8.9 **	-26.2 **
Cónico Norteño	COAH003	0.15	6.5 **	3.0
Ratón	COAH217	0.10	2.8	30.3 **
	COAH223	0.40 **	-2.4	15.6 **
	COAH226	0.90 **	-1	12.2 **
	COAH227	-0.30 **	4.5 **	-8.7
	COAH238	0.05	0.5	23.4 **
	COAH077	0.55 **	1.2	-0.2
	COAH068	0.40 **	-2.3	-3.7
	COAH078	0.10	-3.1	-8.5
Tuxpeño	COAH083	0.20	-4.0 **	-13.5
	COAH089	0.45 **	-1.4	2.5
	COAH177	0.10	-0.8	-16.3
	COAH182	-0.05	-0.4	-9.8
	COAH213	0.15	-5.8 **	-19.8 **
	COAH215	0.40 **	-0.5	-14.3
	COAH069	0.10	1.1	-6.7
	COAH178	0.80 **	1.3	-7.0
Media		0.16	0.7	2.7
EE		0.24	0.82	3.44

*, **: Significativo con base en $\mu + EE$ y $\mu + 2EE$, respectivamente, EE: error estándar, RTO: rendimiento de grano, DFM: días a floración masculina, ALPTA: altura de la planta.

provitamina A; esto indicó que la calidad del grano amarillo como fuente de carotenoides es baja, y por lo tanto, es necesaria alguna fuente rica en provitamina A para incrementar el contenido, tal como lo plantearon Dhliwayo *et al.* (2014); sin embargo, los valores máximos de las FHC fueron similares a los encontrados en poblaciones nativas de México por Lozano-Alejo *et al.* (2007) y Coutiño *et al.* (2008). El limitado contenido de carotenoides de las FHC de cada accesión se asoció con la escasa selección que los productores regionales han realizado sobre el color de grano amarillo, pues aunque existen las variantes de color, este no es comúnmente empleado en la alimentación

humana, a diferencia del grano blanco (Rios *et al.*, 2014).

La selección visual realizada para mejorar el color del grano amarillo como indicador del contenido de carotenoides y provitamina A mostró cambios significativos en las FHC en al menos un carotenoide en cada accesión (Cuadro 6). Entre las FHC de las accesiones con cambios significativos ($P \leq 0.05$) en el contenido de carotenoides destacaron COAH226 y COAH069, aunque en ambos casos disminuyó LUT y ZEAX, hubo incrementos significativos en CRYPT, 13 β C, β CAR, 9 β C, PROA, y por lo tanto, TOTAL; es decir, se mejoró la concentración de

los carotenoides precursores de PROA. La mejora del contenido de carotenoides también mostró diferencias negativas, donde la FHC de COAH075 redujo su contenido de LUT y ZEAX, mientras que en COAH177 disminuyó en β CAR, 9- β C y PROA. En este sentido, Dhliwayo *et al.* (2014) y Sagare *et al.* (2018) mencionaron que el incremento de los carotenoides precursores de PROA afecta la concentración de LUT y ZEAX.

Con base en la diferencia significativa entre la FHC de

la primera generación con respecto a la segunda, se encontró que TOTAL fue modificado en cada accesión; los carotenoides más modificados fueron PROA (siete familias) y CRYPT (cinco familias), mientras que 13 β C fue el único carotenoide modificado no significativamente ($P > 0.05$) entre las FHC.

La mejora genética del contenido de carotenoides (CRYPT, PROA y TOTAL) mostró ganancias entre las

Cuadro 6. Medias y diferencia (DIFC) entre los ciclos de selección en el contenido de carotenoides de poblaciones nativas de maíz amarillo del sureste de Coahuila, México por grupo racial.

Grupo	Accesión	LUT	ZEAX	CRYPT	13 β C	β CAR	9 β C	PROA	TOTAL
Ratón	COAH077	0.19	0.36	0.91	0.32	0.61	0.50	1.88	4.77
	DIFC	0.13	0.20	0.20	0.00	-0.01	0.10	0.18	0.79 **
	COAH226	0.21	0.42	2.28	0.56	1.45	0.97	4.13	10.03
	DIFC	-0.06	-0.16	0.91 **	0.05	0.13 **	0.21 **	0.85 **	1.94 **
Tuxpeño	COAH177	1.58	2.02	2.18	0.37	0.78	0.51	2.75	10.19
	DIFC	0.96 **	1.03 **	0.12	-0.06	-0.24 **	-0.14 **	-0.38 **	1.30 **
	COAH213	0.93	1.45	1.44	0.47	1.17	0.68	3.04	9.18
	DIFC	0.15	0.28 **	-0.19	0.05	0.25	0.08	0.29 **	0.90 **
Tuxpeño Norteño	COAH069	0.26	0.46	1.16	0.41	0.96	0.69	2.65	6.59
	DIFC	-0.22	-0.21	0.36 **	0.09	0.37 **	0.25 **	0.90 **	1.55 **
	COAH178	0.07	0.19	1.22	0.45	1.17	0.63	2.87	6.60
	DIFC	-0.06	-0.10	0.60 **	0.07	0.36 **	0.12	0.86 **	1.85 **
Cónico Norteño	COAH003	0.28	0.48	1.44	0.32	0.63	0.47	2.14	5.76
	DIFC	0.21	0.30 **	0.84 **	-0.02	-0.08	-0.01	0.31 **	1.53 **
Celaya	COAH075	0.14	0.28	0.86	0.28	0.43	0.36	1.50	3.86
	DIFC	-0.46 **	-0.63 **	0.24 **	0.02	0.05	0.07	0.26 **	-0.46 **
Testigo	IMIC-100	1.70	2.94	3.67	0.42	1.07	0.63	3.95	14.4
Testigo	CML-297	2.43	3.23	9.59	0.59	1.69	0.87	7.94	26.3
Mínimo		0.06	0.16	0.60	0.26	0.38	0.29	1.24	3.86
Máximo		1.58	2.02	2.28	0.56	1.45	0.97	4.13	10.19
DSH _a		0.82	0.95	3.00	0.22	0.89	0.51	2.83	5.93
Generación 1		0.39 a	0.64 a	1.01 a	0.36 a	0.77 a	0.5 b	2.13 b	5.80 b
Generación 2		0.45 a	0.7 a	1.41 a	0.39 a	0.90 a	0.6 a	2.62 a	7.09 a
DSH _b		0.2	0.26	0.45	0.05	0.16	0.1	0.47	1.21

LUT: luteína, ZEAX: zeaxantina, CRYPT: criptoxantina, 13 β C: 13-cis β -caroteno, β CAR: β -caroteno, 9 β C: 9-cis β -caroteno, PROA: provitamina A. DIFC: diferencia entre las generaciones de FHC 1 y 2 para cada carotenoide. DSH_a y DSH_b: diferencia significativa honesta para la prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) entre las familias de la generación 2 y la prueba de medias apareadas entre generaciones, respectivamente. Concentraciones en $\mu\text{g g}^{-1}$.

generaciones (0.40, 0.49 y 1.29 $\mu\text{g g}^{-1}$); sin embargo, éstas fueron menores comparadas con el estudio de Dhlwayo *et al.* (2014), quienes reportaron incrementos lineales para CRYPT (0.63-1.73 $\mu\text{g g}^{-1}$), βCAR (0.53-0.66 $\mu\text{g g}^{-1}$) y PROA (0.70-1.18 $\mu\text{g g}^{-1}$) en tres variedades de maíz de polinización libre en tres ciclos de selección.

Los resultados del estudio mostraron que por medio de la selección visual del grano amarillo, y en este caso a través de FHC, fue posible modificar el contenido de carotenoides, particularmente PROA; sin embargo, el efecto de la selección depende directamente del genotipo y de la concentración inicial de los carotenoides, pues se encontró que las familias mostraron respuestas contrastantes a la selección.

Suwarno *et al.* (2014) señalaron que la selección recurrente para PROA es efectiva con base en la determinación de la predominancia de los efectos aditivos sobre los no aditivos, así como una heredabilidad media-alta (0.55-0.99) de la característica; sin embargo, para el incremento del contenido de carotenoides y de PROA a niveles deseables es necesario enriquecer a los progenitores recurrentes a través de fuentes con alta concentración ($\geq 20 \mu\text{g g}^{-1}$) de carotenoides a través de retrocruzamientos.

CONCLUSIONES

La selección visual del color de grano amarillo a través de dos generaciones de FHC mostró modificaciones significativas en el contenido de carotenoides y provitamina A en accesiones de maíz nativo de Coahuila, México; no obstante, entre la diversidad del maíz nativo estudiada se encontró que el contenido de carotenoides es limitado comparado con CML-297. La selección visual del color de grano amarillo causó modificaciones de forma indirecta en el rendimiento de grano, días a floración y la altura de la planta; sin embargo, solo algunas fueron deseables de acuerdo con las necesidades de los productores regionales de Coahuila, México.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal técnico del Laboratorio de Calidad Nutricional de Maíz "Evangeline Villegas Moreno" y particularmente a la encargada, Dra. Natalia Palacios-Rojas, quien permitió la determinación de la concentración de carotenoides en el CIMMYT.

BIBLIOGRAFÍA

Ballesteros M. G., P. Zarazúa V., Y. Salinas M. y L. De la Cruz L. (2019) Fijación del color en grano y características físicas, tecnológicas y

- nutracéuticas en maíz Elotes Occidentales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10:585-599, <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1514>
- Coutiño E. B., G. Vázquez C., B. Torres M. y Y. Salinas M. (2008) Calidad de grano, tortillas y botanas de dos variedades de maíz de la raza Comiteco. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(Esp. 3):9-14, https://doi.org/10.35196/rfm.2008.Especial_3.9
- Dhlwayo T., N. Palacios-Rojas, J. Crossa and K. V. Pixley (2014) Effects of S_1 recurrent selection for provitamin A carotenoid content for three open-pollinated maize cultivars. *Crop Science* 54:2449-2460, <https://doi.org/10.2135/cropsci.2013.11.0764>
- Díaz-Ramírez G., C. De León-García de Alba, D. Nieto-Angel y M. C. Mendoza-Castillo (2020) Ganancia en ciclos de selección recurrente para rendimiento y resistencia a carbón de la espiga en maíz. *Mexican Journal of Phytopathology* 39:61-74, <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2008-1>
- Domínguez-Hernández E., M. Gaytán-Martínez, J. A. Gutiérrez-Uribe and M. E. Domínguez-Hernández (2022) The nutraceutical value of maize (*Zea mays* L.) landraces and the determinants of its variability: a review. *Journal of Cereal Science* 103:103399, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103399>
- Espinosa T. L. C., F. Rincón S., N. A. Ruiz T., J. M. Martínez R. y A. Benavides M. (2019) Respuesta ambiental de poblaciones nativas de maíz del sureste de Coahuila, México. *Nova Scientia* 11:108-125, <https://doi.org/10.21640/ns.v11i23.1931>
- Khamkoh W., D. Kethaisong, K. Lomthaisong, K. Lertrat and B. Suriham (2019) Recurrent selection method for improvement of lutein and zeaxanthin in orange waxy corn populations. *Australian Journal of Crop Science* 13:566-573, <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.04.p1507>
- Lozano-Alejo N., G. Vázquez C., K. Pixley and N. Palacios-Rojas (2007) Physical properties and carotenoid content of maize kernels and its nixtamalized snacks. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 8:385-389, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.015>
- Menkir A., T. Rocheford, B. Maziya-Dixon and S. Tanumihardjo (2015) Exploiting natural variation in exotic germplasm for increasing provitamin-A carotenoids in tropical maize. *Euphytica* 205:203-217, <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1426-z>
- Menkir A., I. Dieng, W. Mengsha, S. Meseke, B. Maziya-Dixon, O. E. Alamu, ... and M. M. Coulibaly (2021) Unravelling the effect of provitamin A enrichment on agronomic performance of tropical maize hybrids. *Plants* 10:1580, <https://doi.org/10.3390/plants10081580>
- Muthusamy V., F. Hossain, N. Thirunavukkarasu, S. Saha, P. K. Agrawal, S. K. Guleria and H. S. Gupta (2015) Genetic variability and interrelationship of kernel carotenoids among indigenous and exotic maize (*Zea mays* L.) inbreds. *Cereal Research Communications* 43:567-578, <https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.012>
- Nájera C. L. A., F. Rincón S., N. A. Ruiz T. y F. Castillo G. (2010) Potencial de rendimiento de poblaciones criollas de maíz de Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(Esp. 4):31-36, https://doi.org/10.35196/rfm.2010.Especial_4.31
- Ortiz-Monasterio J. I., N. Palacios-Rojas, E. Meng, K. Pixley, R. Trethowan and R. J. Peña (2007) Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding. *Journal of Cereal Science* 46:293-307, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.005>
- Palacios-Rojas N. (2018) Calidad Nutricional e Industrial de Maíz. Protocolos. CIMMYT. El Batán, Texcoco, México. 160 p.
- Rios S. A., M. C. D. Paes, W. S. Cardoso, A. Borém and F. F. Teixeira (2014) Color of corn grains and carotenoid profile of importance for human health. *American Journal of Plant Sciences* 5:857-868, <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.56099>
- Sagare D. B., P. Shetti, M. Surender, S. S. Reddy, T. Pradepp and G. Anuradna (2018) Maize: Potential crop for provitamin A biofortification. *Maydica* 63:1-11.
- Sánchez-Hernández M. A., G. Morales-Terán, S. I. Mendoza-Pedroza, J. Hernández-Bautista, S. Fraire-Cordero y M. A. Rivas-Jacobo (2021) Caracterización productiva de maíces nativos con aptitud forrajera en la cuenca baja del Papaloapan. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44:755-764, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4-A.755>
- Sánchez-Ramírez F. J., M. C. Mendoza-Castillo y C. G. Mendoza-Mendoza

- (2016) Estabilidad fenotípica de cruasas simples e híbrido comerciales de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:269-275, <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.3.269-275>
- SAS Institute (2004) SAS/STAT® 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 121 p.
- Senete C. T., P. E. O. Guimarães, M. C. D. Paes and J. C. de Souza (2011) Diallel analysis of maize inbred lines for carotenoids and grain yield. *Euphytica* 182:395-404, <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0513-z>
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional (2025) Normales climatológicas por estado (Nuevo León y Coahuila). Servicio Meteorológica Nacional. Ciudad de México, México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado> (Marzo 2025).
- Suwarno W. B., K. V. Pixley, N. Palacios-Rojas, S. M. Kaeppler and R. Babu (2014) Formation of heterotic groups and under-standing genetic effects in a provitamin A biofortified maize breeding program. *Crop Science* 54:14-24. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.02.0096>