

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFFECTOS DE LA SELECCIÓN SOBRE CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS Y
CONTENIDO DE CAROTENOIDES DE MAÍZ AMARILLO NATIVO DE
COAHUILA

Tesis

Que presenta ROSEMBERG HERNÁNDEZ RUIZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

EFFECTOS DE LA SELECCIÓN SOBRE CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS Y
CONTENIDO DE CAROTENOIDES DE MAÍZ AMARILLO NATIVO DE
COAHUILA

Tesis


Elaborada por ROSEMBERG HERNÁNDEZ RUIZ como requisito parcial para obtener
el grado de Maestro en Ciencias en Fitomejoramiento con la supervisión y aprobación
del Comité de Asesoría



Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez
Director de Tesis



Dr. Froylán Rincón Sánchez
Asesor



Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Comité de Asesoría, compuesto por el **Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez, Dr. Froylán Rincón Sánchez y a la Dra. Norma Angelica Ruíz Torres**, por la oportunidad de llevar este trabajo de investigación. Su orientación, asistencia, dedicación y por su valioso tiempo que me brindaron para la culminación de este proyecto.

Expreso mi gratitud a la **Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”** por permitirme avanzar en mi formación profesional a través del Departamento de Fitomejoramiento.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la ayuda económica proporcionada durante mis estudios de Posgrado, el cual ha sido esencial para mi desarrollo académico.

DEDICATORIA

Agradezco a **Dios** por brindarme la vida y permitirme completar otra etapa en mis estudios, guiándome siempre por el camino del bien.

A mis padres y hermanos: **Floreli Ruiz Diaz, Álvaro Hernández Pérez, Graciela Hernández Ruiz y Fernando Hernández Ruiz**, les expreso mi profundo agradecimiento por su amor y cariño. Valoro inmensamente sus palabras de motivación y la confianza que depositaron en mí. Su sacrificio y apoyo fueron fundamentales para que pudiera alcanzar otra de mis metas en la vida.

Expreso mi gratitud a todas mis amigas y amigos, en particular: **Coyolicatzin Chávez, Iván Rodríguez, Uriel Moreno**, por su amistad y efecto incondicional. Su compañía ha sido invaluable en este camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	3
Hipótesis	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Importancia de los maíces nativos	4
Valor nutraceútico de los maíces nativos	4
Importancia de los carotenoides para la salud humana	5
Síntesis de pigmentos	6
Mejoramiento genético por selección de color de grano	6
MATERIALES Y MÉTODOS	9
Etapla I. Efecto de la selección en características agronómicas	9
Material vegetal	9
Método de mejoramiento	10
Localidades de evaluación	11
Diseño experimental	11
Siembra	11
Manejo de los experimentos	11
Fertilización	12
Labores culturales	12
Características evaluadas	13
Análisis de la información agronómica	14
Etapla II. Efecto de la selección en contenido de carotenoides y provitamina A	15
Material genético	15

Tamaño de muestra de grano	15
Análisis químicos	15
Determinación de carotenoides en harina de maíz por UPLC	15
Variables evaluadas.....	18
Análisis de la información	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
Etapa I. Efecto de la selección en características agronómicas	19
Comportamiento agronómico de las familias de maíz amarillo de Coahuila	19
Características agronómicas de las familias por localidad de evaluación.....	21
Análisis de la interacción de las familias x localidades de evaluación	24
Etapa II. Efecto de la selección en el contenido de carotenoides y provitamina A	26
Contenido de carotenoides en grano de maíz amarillo de Coahuila	26
Dureza y coloración del grano en familias de maíz amarillo de Coahuila en dos generaciones de selección visual.....	30
Análisis de componentes principales en la determinación del contenido de carotenoides	32
CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS	36

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3. 1. Familias de maíz amarillo de Coahuila y su origen altitudinal	9
Cuadro 3. 2. Grupo racial y área de adaptación de las familias de hermanos completos de maíz amarillo de Coahuila empleadas en la cuantificación del contenido de carotenoides.	15
Cuadro 3. 3. Clasificación del grano de maíz por su dureza de acuerdo a la NMX-FF-034/1-SCFI-2002.	17
Cuadro 4. 1. Cuadrados medios del análisis de varianza de los caracteres agronómicos en familias de hermanos completos de maíz amarillo nativo de Coahuila evaluados en 2022.	20
Cuadro 4. 2. Valores medios de rendimiento y características agronómicas de las familias mejoradas para color de grano evaluadas en diferentes localidades del sureste de Coahuila en 2022.	22
Cuadro 4. 3. Contenido de carotenoides totales y provitamina A de nueve familias de hermanos completos de maíz amarillo de Coahuila evaluadas en 2022.	27
Cuadro 4. 4. Índice de flotación y la coloración del grano obtenida mediante Hunter Lab en las Generaciones 1 y 2 de nueve familias evaluadas en 2022.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1. Interacción Familias x Localidades de evaluación con base en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) evaluadas en tres localidades en 2022. GC = General Cepeda; MEZ= El Mezquite; BV = Buenavista; En el identificador de familias los últimos dígitos corresponden al grupo racial: C = Celaya; CN = Cónico Norteño; R = Ratón; T = Tuxpeño; TN = Tuxpeño Norteño, la versión mejorada de la familia está indicada por _M.	25
Figura 4. 2. Dispersión gráfica de la interacción entre las variables carotenoides totales (Carotenos T), provitamina A (ProA) e índice de flotación (IF) en familias de maíz amarillo nativos de Coahuila, 2022 con base en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2). En el identificador de familias los últimos dígitos corresponden al grupo racial: C = Celaya; CN = Cónico Norteño; R= Ratón; T = Tuxpeño; TN = Tuxpeño Norteño; -M en el identificador de familias corresponde a la versión mejorada.	33

RESUMEN

**EFFECTOS DE LA SELECCIÓN SOBRE CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS Y
CONTENIDO DE CAROTENOIDES DE MAÍZ AMARILLO NATIVO DE
COAHUILA**

POR

**ROSEMBERG HERNÁNDEZ RUIZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

**DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMÍREZ
ASESOR**

Saltillo, Coahuila

Julio 2024

En la historia del mejoramiento genético en maíz, el objetivo principal ha sido rendimiento de grano; sin embargo, recientemente se ha puesto mayor énfasis al desarrollo de variedades con alto contenido nutricional, tales como antocianinas (granos morados y azules) y los carotenoides (granos amarillos y naranjas). En Coahuila, se han identificado maíces nativos pigmentados entre la diversidad existente y sobre el cual se han realizado investigaciones para mejorar la producción, enfocándose especialmente en el contenido de carotenoides (provitamina A) en los maíces amarillos. Una limitante en la mejora de la concentración de los carotenoides es la determinación en el laboratorio en cada generación e individuo seleccionado; no obstante, ante esta limitante, se realizó selección visual para color de grano en dos generaciones de familias de hermanos completos y se evaluó posteriormente las generaciones para conocer el efecto. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la selección sobre las características agronómicas y el contenido de carotenoides totales en 18 familias de hermanos completos de maíz amarillo nativo de Coahuila. Las familias fueron derivadas de nueve poblaciones, de las cuales se extrajeron 180 semillas para llevar a cabo la caracterización agronómica de cada generación, la semilla para la determinación bioquímica en el laboratorio se obtuvo mediante polinizaciones fraternales (#PaP). La evaluación agronómica fue realizada en 2022, en tres localidades: Buenavista, Saltillo, Coah. (1732 m), General Cepeda, Coah. (1350 m) y El Mezquite, Galeana, N.L. (1890 m). Los resultados del análisis de varianza de la evaluación agronómica mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) entre las localidades en todas las variables evaluadas. Entre generaciones de selección, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en longitud de mazorca, mientras que, para asincronía floral, altura de planta y diámetro de mazorca se observaron diferencias ($P \leq 0.05$). El análisis del efecto de interacción Fam x Loc fue significativa ($P \leq 0.01$) para rendimiento de grano, días a floración masculina, altura de planta y longitud de mazorca. La interacción Gen x Loc fue significativa ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano, días a floración masculina y asincronía floral. Estas modificaciones se asociaron directamente con el efecto de la localidad, y el efecto del genotipo, más que al efecto de la selección. La interacción Gen x Fam fue significativa ($P \leq 0.05$) solo para la variable rendimiento de grano. Esta interacción indicó que algunas familias respondieron de manera diferente a la selección debido a su propia constitución genética. El contenido de carotenoides en las diferentes familias varió de 1.97

a 8.49 mg kg^{-1} , entre esta diversidad, F5C-M, F16TN-M, F19T-M y F24R presentaron el mayor contenido. Al analizar el efecto de la selección, se encontraron diferencias entre las familias; para la Luteína y Zeaxantina, las modificaciones fueron desde -0.23 hasta 1.1 mg kg^{-1} , y de -0.28 a 1.46 mg kg^{-1} . En cuanto a β -criptoxantina, las modificaciones por la selección fueron más amplias que en Luteína y Zeaxantina, ya que los valores variaron de -1.63 hasta 3.2 mg kg^{-1} ; la F5C-M destacó por su contenido y su incremento en la concentración (8.49 mg kg^{-1}). Los resultados mostraron que el contenido de carotenoides en los maíces nativos evaluados es bajo en relación con las necesidades básicas del ser humano; sin embargo, es posible incrementar la concentración mediante selección para color de grano.

Palabras clave: selección, maíz nativo, carotenoides, provitamina A.

ABSTRACT

EFFECTS OF SELECTION ON AGRONOMIC CHARACTERISTICS AND
CAROTENOID CONTENT OF NATIVE YELLOW CORN FROM COAHUILA

BY

ROSEMBERG HERNÁNDEZ RUIZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS ENFITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMÍREZ

ADVISOR

Saltillo, Coahuila

Julio 2024

In the history of the genetic improvement in corn, the primary objective has been grain yield; however, more recently, there has been a greater emphasis on developing varieties with high nutritional content, such as anthocyanins (purple and blue kernels) and carotenoids (yellow and orange kernels). In Coahuila, pigmented native corn populations have been identified among the existing diversity, and research has been conducted to improve production, focusing particularly on carotenoid content (provitamin A) in yellow corn. One limitation in enhancing carotenoid concentration is the need for laboratory determination in each generation and selected individual; nevertheless, visual selection for grain color was performed in two generations of full-sib families, followed by evaluations to determine the effect. The objective of this study was to evaluate the effect of selection on agronomic characteristics and total carotenoid content in 18 full-sib families of native yellow corn from Coahuila. The families were derived from nine populations, from which 180 seeds were extracted to conduct the agronomic characterization of each generation, while seeds for biochemical determination in the laboratory were obtained through sibling pollinations (#PaP). The agronomic variable evaluation was made in 2022 in three locations: Buenavista, Saltillo, Coah. (1732 m), General Cepeda, Coah. (1350 m), and El Mezquite, Galeana, N.L. (1890 m). The results of the agronomic evaluation variance analysis showed differences ($P \leq 0.01$) among locations in all evaluated variables. Significant differences ($P \leq 0.01$) were found in ear length among selection generations, while differences in floral asynchrony, plant height, and ear diameter were observed ($P \leq 0.05$). The analysis of the Fam x Loc interaction effect was significant ($P \leq 0.01$) for grain yield, days to male flowering, plant height, and ear length. The Gen x Loc interaction was significant ($P \leq 0.05$) for grain yield, days to male flowering, and floral asynchrony. These modifications were directly associated with the location and the genotype effects, rather than the selection effect. The Gen x Fam interaction was significant ($P \leq 0.05$) only for the grain yield variable. This interaction indicated that some families responded differently to selection due to their unique genetic constitution. The carotenoid content in the different families ranged from 1.97 to 8.49 mg kg⁻¹, with F5C-M, F16TN-M, F19T-M, and F24R showing the highest content. Analyzing the effect of selection, differences were found among families; for lutein and zeaxanthin, modifications ranged from -0.23 to 1.1 mg kg⁻¹ and -0.28 to 1.46 mg kg⁻¹, respectively.

Regarding β -cryptoxanthin, the selection-induced modifications were broader than those for lutein and zeaxanthin, with values ranging from -1.63 to 3.2 mg kg⁻¹; F5C-M stood out for its content and increase in concentration (8.49 mg kg⁻¹). The results showed that the carotenoid content in the evaluated native corn is low concerning human basic needs; however, it is possible to increase the concentration through selection for grain color.

Key words: selection, native corn, carotenoids, provitamin A.

INTRODUCCIÓN

México es considerado como centro de origen y diversidad del maíz. La amplia diversidad existente se ha clasificado en 64 grupos raciales, de los cuales, 59 se consideran endémicos del país (CONABIO, 2022); cada uno de estos con características morfológicas, bioquímicas, genéticas y moleculares particulares (Warburton *et al.*, 2008).

Entre la amplia diversidad del maíz en México, existe también extensa variación para el color del grano. Este es determinado por dos tipos de pigmentos, los carotenoides en los granos amarillos y anaranjados, y las antocianinas en los azules y morados (Egesel *et al.*, 2003). Las variantes con pigmentación se observan en 41 grupos raciales, manifestándose no solo en el color del grano, sino también, por la presencia de antocianinas en las hojas, tallos, brácteas y olotes (Ortega *et al.*, 1991).

En México, la producción de maíz ocurre bajo una amplia diversidad genotípica; sin embargo, por la coloración del grano, destacan tres variantes: blanco, amarillo y azul. El maíz blanco se cultiva exclusivamente para el consumo, mientras que, el maíz amarillo se utiliza principalmente para el procesamiento industrial y a la alimentación pecuaria; el azul, para usos gastronómicos especiales. Estas variantes se producen a través de los dos ciclos agrícolas: primavera-verano y otoño-invierno, bajo las diferentes condiciones agroclimáticas y distintos sistemas agrícolas.

En el establecimiento de programas de mejoramiento, el rendimiento ha sido uno de los principales objetivos; sin embargo, en la actualidad y particularmente con el interés de mejorar la calidad de los alimentos, recientemente se le ha dado mayor importancia al desarrollo de variedades con contenido químico nutrimental diferenciado y con alta concentración de agregados nutraceuticos (Serna-Saldívar, 2010).

En el maíz, el color amarillo del grano se asocia principalmente a los carotenoides, que se describen como pigmentos naturales solubles en grasa y que se encuentran principalmente en plantas, algas y bacterias fotosintéticas, desempeñando un papel crucial en el proceso fotosintético. Los carotenoides poseen una estructura química compuesta por un esqueleto de 40 carbonos, formado por unidades de isopreno (Grotewold, 2006).

El contenido de carotenoides en los granos de maíz se encuentra determinada por el genotipo y exhibe una notable diversidad entre las distintas poblaciones, lo que sugiere un potencial de mejora. Además, es importante tener en cuenta que la calidad general de los

granos de maíz puede verse determinada de manera significativa por la interacción del genotipo con el ambiente.

Dentro de la diversidad del maíz nativo de Coahuila se han identificado diversas variantes de color del grano; con base en esta diversidad, se ha realizado selección para la mejora de la coloración del grano amarillo y del contenido de carotenoides.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la selección visual sobre las características agronómicas y el contenido de carotenoides totales en las poblaciones de maíz amarillo de Coahuila, a través de la comparación de dos generaciones de familias de hermanos completos derivadas de las poblaciones de maíz amarillo del estado de Coahuila y seleccionadas de forma visual para el color del grano. La selección se realizó en las mazorcas y en el grano que mostraron la mayor coloración amarilla-anaranjada.

La evaluación consistió en 18 familias de maíz amarillo en dos generaciones de selección visual, estas familias fueron sometidas a un proceso de selección enfocado en el color de los granos, clasificando las muestras de acuerdo con su apariencia cromática. La evaluación agronómica de las familias se llevó a cabo en tres localidades diferentes: Buenavista, Saltillo, General Cepeda, Coah, y El Mezquite, Galeana, N.L. Con semillas obtenidas por polinizaciones fraternales (PaP) se determinó el contenido de carotenoides totales y provitamina A en el laboratorio de calidad nutricional de maíz en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en Texcoco, Estado de México.

Objetivos

- 1) Determinar el efecto de la selección visual para color de grano, sobre las características agronómicas en dos generaciones de familias de hermanos completos de maíz amarillo de Coahuila.
- 2) Determinar el efecto de la selección visual para el color de grano, sobre el contenido de carotenoides y provitamina A en familias de hermanos completos de maíz amarillo de Coahuila.

Hipótesis

Ho: La selección visual para el color amarillo de grano en las familias de maíz de hermanos completos, no modifica la expresión de las características agronómicas, ya que se enfoca exclusivamente en el color de grano.

Hi: La selección visual para color amarillo de grano en las familias de maíz de hermanos completos, modifica la expresión de las características agronómicas, aunque se enfoque exclusivamente en color el color de grano.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia de los maíces nativos

El maíz, desde el punto de vista alimentario, político, económico y social, es el cultivo más importante (SADER, 2020); su consumo *per cápita* de maíz en México es aproximadamente 10 veces mayor que el de Estados Unidos de América (Serna-Saldívar y Amaya-Guerra, 2008); no obstante, la tendencia ha mostrado una disminución en el consumo de maíz para tortilla, lo cual muestra que el consumo de maíz se ha diversificado. De la superficie total sembrada con maíz (6.871 millones de ha), la mayor parte (79 %) es de temporal o secano (SIAP, 2022). El maíz blanco se produce exclusivamente para el consumo humano, mientras que el maíz amarillo se destina al procesamiento industrial y a la alimentación animal. Ambos se cultivan en dos ciclos productivos: primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI), bajo diversas condiciones agroclimáticas (humedad, temporal y riego) y diferentes tecnologías (SADER, 2020).

En el sistema de temporal y principalmente los pequeños productores, es donde se seleccionan, producen, conservan, diversifican y domestican los maíces nativos de acuerdo con sus necesidades (Turrent-Fernández *et al.*, 2012).

Valor nutraceutico de los maíces nativos

Los compuestos nutraceuticos presentes en el maíz son compuestos cuyo consumo contribuye a la prevención e incluso al tratamiento de enfermedades crónico-degenerativas en lo seres humanos. Existen dos principales familias de pigmentos asociados al maíz, los de naturaleza fenólica, como las antocianinas (granos azules) y los carotenoides (granos amarillos). Estos pigmentos, al presentarse de manera natural en los granos de maíz, resultan de gran interés para la industria alimentaria ya que brindan coloración a sus productos sin necesidad de incorporar colorantes artificiales (Borrás, 2020). Los maíces ricos en antocianinas y en carotenoides pueden ser considerados como nutraceuticos debido a sus efectos preventivos contra el estrés oxidativo, las enfermedades crónico-degenerativas y el cáncer (Serna-Saldívar *et al.*, 2013).

Las propiedades nutraceuticas del maíz están íntimamente ligadas con su composición fitoquímica (antocianinas, carotenoides, fenoles, fibras, fitoesteroles), donde los maíces nativos constituyen una fuente de diversidad fenotípica y genotípica por explorar, porque contiene gran cantidad de compuestos con relevantes propiedades nutraceuticas (Serna-

Saldívar *et al.*, 2013). Los carotenoides tienen un rol central en la pigmentación amarilla y anaranjada de los granos de maíz. Estos pigmentos contribuyen a su tonalidad y luminosidad.

De acuerdo con su configuración molecular, los carotenoides se clasifican en dos categorías principales; en carotenos (α -caroteno y β -caroteno) y xantofilas (luteína, zeaxantina, α -criptoxantina y β -criptoxantina (Rodríguez y Kimura, 2004). Algunos de ellos son precursores de la vitamina A (α -caroteno, β -caroteno, α -criptoxantina y β -criptoxantina), fundamental para múltiples procesos biológicos (Ortiz *et al.*, 2016).

Importancia de los carotenoides para la salud humana

Los carotenoides son compuestos promotores de la salud, que se utilizan ampliamente en nuestra dieta diaria para mitigar el riesgo de enfermedades crónicas (Ashokkumar *et al.*, 2023). Los biopigmentos se utilizan para sustituir a los colorantes sintéticos, motivados por el deseo de desarrollar pigmentos respetuosos con el medio ambiente y menos peligrosos (Charalampia y Koutelidakis, 2017). Son sintetizados por plantas y microorganismos, pero no por animales. En las plantas, desempeñan un papel crucial en la maquinaria fotosintética y proporcionan protección contra la fotosensibilidad. En la dieta humana, las frutas y verduras son las principales fuentes de carotenoides, presentes como microcomponentes responsables de los colores amarillo, naranja y rojo, son fuente esencial de vitamina A. Aunque se han identificado más de 600 carotenoides en la naturaleza, solo alrededor de 40 se encuentran presente en la dieta humana, y aproximadamente 20 de ellos han sido identificados en la sangre y tejidos humanos. Entre estos, el β -caroteno, α -caroteno, licopeno, luteína y criptoxantina representan cerca del 90% de los carotenoides en la dieta y el cuerpo humano (Rao y Rao, 2007).

Los β -carotenos son convertidos en la forma activa de la vitamina A o retinol, considerada como la de mayor relevancia en nutrición humana, porque previene la ceguera total y nocturna, y otras enfermedades como xeroftalmia, cáncer, enfermedades cardiovasculares, y también ayuda a reforzar el sistema (Serna-Saldívar *et al.*, 2013). Las xantofilas: luteína, zeaxantina y criptoxantina ayudan a prevenir la degeneración macular asociada con la ceguera, especialmente en adultos mayores (Serna-Saldívar *et al.*, 2013). La deficiencia de vitamina A es común en los países en desarrollo, pero rara en los países desarrollados. Los efectos más graves de esta deficiencia se observan en los niños

pequeños y en las mujeres embarazadas de los países de bajos ingresos (OMS, 2009). Esta carencia incide en la inmunodeficiencia, y también negativamente en el desarrollo cognitivo y en el crecimiento, además de aumentar la mortalidad de mujeres durante el embarazo (West and Darnton, 2008). Dado que el organismo humano no sintetiza de manera independiente esta vitamina, resulta imperativo obtenerla o sus precursores a través de fuentes externas.

Síntesis de pigmentos

La síntesis de estos pigmentos se produce en una vía metabólica que se divide en dos ramas: alfa y beta. El flujo está regulado por la actividad de la enzima licopeno épsilon ciclasa (Harjes *et al.*, 2008). Las variaciones en el locus de esta proteína pueden influir en la concentración final de los carotenoides producidos por ambas ramas de la ruta metabólica.

La concentración de carotenoides en los granos de maíz varía significativamente, desde aproximadamente 0 mg kg⁻¹ en granos de color blanco hasta alrededor de 30 mg kg⁻¹ en granos de color amarillo-anaranjado (Harjes *et al.* 2008; Kljak *et al.* 2014). Más del 70% de los carotenoides totales se encuentran en el endospermo duro (vítreo), mientras que el resto se distribuye entre el endospermo harinoso, el germen y el pericarpio (Blessin *et al.*, 1963).

Mejoramiento genético por selección de color de grano

En el mejoramiento poblacional, la selección consiste en la aplicación de metodologías que permitan modificar la media genotípica de una población, de una generación a la siguiente. Para ello, es necesario seleccionar dentro de la población, a los individuos o grupos de individuos (familias) que muestren la mayor expresión de la característica por mejorar. Bajo esta consideración, en cada ciclo de selección se elegirán los individuos superiores que constituirán los progenitores seleccionados que, mediante recombinación o apareamiento aleatorio, se espera que la media de su progenie sea superior a la media genotípica de la población original (Molina, 1992).

Por lo tanto, la variabilidad genética es esencial para el éxito en programas de mejoramiento genético de plantas. Esta variabilidad determina el progreso de la selección y las magnitudes relativas de sus componentes, así como la interacción genotipo por ambiente, también le indican al fitomejorador qué método de selección es más adecuado,

y si también es apropiado para mejorar otras características de interés y, en qué medida debe ser probado el germoplasma (en función de años, localidades y repeticiones) para identificar los genotipos superiores (Bernardo, 2020).

La selección recurrente es un método de mejoramiento muy importante y una estrategia alternativa para mejorar las poblaciones vegetales, especialmente en especies de polinización cruzada (Vasal *et al.*, 2004). Este método de selección puede acumular genes deseables o fenotipos y promover la recombinación para crear nuevas combinaciones alélicas para el mejoramiento genético dentro de la población (Hallauer *et al.*, 1988).

Para la mejora del rendimiento, los carotenoides, la provitamina A, la luteína, la zeaxantina, Dhliwayo *et al.* (2014), indicaron que la selección recurrente puede ser un método efectivo; Preciado-Ortiz *et al.* (2013), demostraron que puede mejorar el contenido de aceite, las propiedades físicas del grano, así como la resistencia a la pudrición de la mazorca por *Fusarium* y la resistencia al acame (Horne *et al.*, 2016).

El método de selección recurrente de familias de hermanos completos (HC) se ha usado exitosamente para otras características además del rendimiento de grano; para reducir las alturas de planta y de mazorca, el tamaño de espiga, el ciclo fenológico, el intervalo de antesis a floración femenina y la esterilidad, y para mejorar prolificidad, índice de cosecha, y la tolerancia a sequía, insectos y enfermedades (Coutiño *et al.*, 2008). Según Souza (1999), el desarrollo de progenies, su evaluación en la región de interés, la selección de los mejores individuos y su recombinación por varios ciclos hace que las poblaciones mejoradas lleguen a ser agronómicamente superiores a las originales y a mantener suficiente variabilidad genética en los caracteres elegidos, lo que les permite seguir en uso a largo plazo.

Khamkoh *et al.* (2019) encontraron, a través de selección recurrente para el mejoramiento de luteína y zeaxantina en poblaciones de maíz ceroso naranja, que la mejora de los carotenoides en los granos de maíz ceroso agregaría valores benéficos, ya que estos fitoquímicos son útiles para la salud humana. Sin embargo, el progreso del mejoramiento del maíz ceroso para obtener carotenoides altos puede depender de la variación genética de estos caracteres y de los métodos de selección apropiados. Las variaciones de los carotenoides (provitamina A) en el maíz fueron pequeñas, luteína (15.5 %), la zeaxantina (9.7 %), el β -caroteno (10.6 %) y los carotenoides totales (3.6 %). El estudio realizado por

Kljak *et al.* (2014), establece una relación directa entre la concentración de carotenoides en los granos de maíz y su apariencia visual.

De acuerdo con Suwarno *et al.* (2014), la selección de carotenoides puede ser eficaz en las primeras generaciones y es posible mejorar esta característica mediante la selección recurrente (Senete *et al.*, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Etapas I. Efecto de la selección en características agronómicas

Material vegetal

En el experimento se evaluaron 18 familias de hermanos completos obtenidas de nueve poblaciones de maíz amarillo de Coahuila, y que pertenecen a cinco grupos raciales (Cuadro 3.1.).

Cuadro 3. 1. Familias de maíz amarillo de Coahuila y su origen altitudinal.

Grupo racial	Accesiones	Familias	Área de adaptación (Altitud) [†]
Celaya	F5C	1	Intermedia
Cónico Norteño	F13CN	1	Altura, Transición, Intermedia
Ratón	F8R	6	Intermedia, Baja
	F22R		Intermedia, Baja
	F23R		Intermedia, Baja
	F24R		Intermedia, Baja
	F25R		Intermedia, Baja
	F27R		Intermedia, Baja
Tuxpeño	F1T	8	Intermedia, Baja
	F9T		Intermedia, Baja
	F10T		Intermedia, Baja
	F11T		Intermedia, Baja
	F15T		Intermedia, Baja
	F18T		Intermedia, Baja
	F19T		Intermedia, Baja
	F21T		Intermedia, Baja
Tuxpeño Norteño	F3TN	2	Intermedia, Baja
	F16TN		Intermedia, Baja
Total		18	

[†]Área de adaptación = (Altitud en msnm), Bajo (< 1000), Intermedio (1001-1800), Transición (1801-2000) y Altura (> 2001).

Método de mejoramiento

Entre la diversidad del maíz nativo de Coahuila, se encontraron poblaciones con alta frecuencia de grano pigmentado; las semillas pigmentadas fueron extraídas para cada población y establecidas en un lote de polinización, y dentro de cada población se realizaron autofecundaciones.

Con las mazorcas obtenidas se realizó una selección para color de grano y particularmente se puso énfasis en el tipo de mazorcas acorde al grupo racial de origen; las mazorcas seleccionadas fueron desgranadas en masa; en algunas poblaciones se obtuvo más de una variante por población.

Con una muestra de granos obtenida de las mazorcas se realizó el incremento de la semilla a través de polinizaciones fraternales (PaP) cuidando la semejanza entre el par de plantas; durante la cosecha se empleó el mismo procedimiento de selección anterior: color de grano y mazorcas con características del grupo racial. Todas las mazorcas de cada variante o de la población se desgranaron en masa.

Con la semilla obtenida, de cada población, en el siguiente ciclo y en el lote de polinización se realizó la selección de plantas con características similares, y durante la polinización se tomó en cuenta el tamaño de mazorca; de esta forma se realizaron polinizaciones fraternales (#PaP) entre individuos semejantes, entre los cuales se cuidó el etiquetado de las bolsas de polinizar. Al final las mazorcas obtenidas fueron seleccionadas, entre los grupos de plantas semejantes cuidando conservar el par de mazorcas, es decir, una selección intrafamiliar, con base en el color de grano y sanidad. Este ciclo se identificó como la primera generación y los grupos de mazorcas fueron etiquetados en función del tamaño y tipo de mazorca y el color del grano.

En el siguiente ciclo, con las familias obtenidas del ciclo anterior, se realizó el mismo procedimiento de selección de las plantas, así como de los jilotes, en donde se observó una homogeneidad dentro de las familias y diferencias entre las familias. A este siguiente ciclo se le denominó segunda generación y fue también diferenciado en función del tamaño y tipo de mazorca, así como por el color del grano.

Con ambas generaciones obtenidas, donde visualmente se observaron diferencias en la coloración del grano, se seleccionó la familia de mayor coloración de la segunda

generación y la familia de la generación anterior que le dio origen, y con ellas se realizó la evaluación en campo y en el laboratorio.

Localidades de evaluación

La evaluación agronómica de las dos generaciones de las 18 familias de hermanos completos fue realizada en tres localidades:

- 1) Campo Agrícola Experimental “Buenavista” de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila en las coordenadas 25°21′31” latitud Norte y 101°02′25” longitud Oeste, a una altura de 1732 msnm, el clima es seco semicálido con invierno fresco con lluvias en verano, con 330 mm de precipitación y una temperatura media anual de 19.8 °C.
- 2) Ejido “El Mezquite”, Galeana, Nuevo León, en las coordenadas latitud Norte 25°14′30 y 100°73′36 longitud Oeste, a una altura de 1890 msnm, el clima es seco caluroso y en invierno las temperaturas son suaves, con 416 mm de precipitación y una temperatura media anual de 15 °C.
- 3) Localidad municipio “General Cepeda”, Coah, en las coordenadas latitud Norte 25°22′39” y 101°28′32” longitud Oeste, a una altura de 1350 msnm, el clima es semiárido, con una precipitación media anual de 280 mm y la temperatura media anual es de 18 °C.

Diseño experimental

Las familias se evaluaron en experimentos repetidos en surcos (unidad experimental) de 4 m de largo, con una densidad de 50 mil plantas ha⁻¹. La distancia entre plantas fue de 0.2 m y 0.85 m entre surcos. Se sembraron 30 semillas por cada unidad experimental para finalmente dejar 21 plantas por parcela. El diseño experimental empleado fue de bloques completos al azar.

Siembra

En Buenavista, Saltillo, Coah, la siembra se estableció, el 18 de mayo de 2022; en el Mezquite, Galeana, N.L, la fecha de siembra fue el 20 de mayo de 2022 y en General Cepeda, Coah, se realizó la siembra el 27 de mayo de 2022.

Manejo de los experimentos

Las localidades de evaluación son una muestra representativa de las condiciones regionales de los ambientes de producción bajo los cuales se establece el cultivo; El Mezquite es una localidad de transición, que por sus características ambientales y de manejo agronómico

se considera la de mayor aptitud para la producción de grano, seguida de Buenavista y General Cepeda; esta última, de condiciones ambientales adversas, debido a la presencia de temperaturas elevadas, que provocan además del estrés térmico, la presencia de gusano cogollero, entre las principales plagas.

En el estudio, la expresión agronómica en El Mezquite quedó condicionada a un manejo inadecuado del riego, lo cual provocó estrés por sequía y una disminución considerable de la producción. En esta localidad, el experimento quedó situado en la orilla de la parcela, donde el sistema de riego por aspersión mostraba deficiencias en su calibración y, por lo tanto, la lámina de riego fue menor, lo que produjo una evidente disminución en la altura de la planta y finalmente en el rendimiento de grano.

Fertilización

Antes de la siembra, se aplicó una fertilización de fondo con una dosis de 60N-60P-60K en cada una de las localidades; posteriormente, durante el aporque, se realizó una segunda fertilización con la fórmula 60N-00P-00K.

Labores culturales

En todas las localidades, durante el desarrollo del cultivo, se controlaron las malezas mediante dos aplicaciones de herbicidas, la primera se realizó 15 días después de la siembra y la segunda después del aporque.

Características evaluadas

Características agronómicas

Rendimiento de grano (RTO). Se estimó determinando el peso seco (PS) y multiplicándolo por un factor de conversión (FC) de la superficie de la parcela experimental a una hectárea. Este valor se multiplica por el porcentaje de desgrane para obtener el rendimiento de grano:

$$PS = PC \times \left(1 - \frac{H}{100}\right)$$

donde:

PC = Peso de campo (mazorcas por parcela).

H= Contenido de humedad, obtenida con una muestra de grano secado en estufa.

El peso seco fue además multiplicado por un factor de conversión:

$$FC = \frac{100}{85} \times \frac{1000}{APU} \div 1000$$

Área de parcela útil (APU): Se calculo multiplicando la distancia entre surcos (diferente en cada localidad) por la distancia entre plantas y por el número de plantas por unidad experimental. El coeficiente 100/85 se utilizó para ajustar el rendimiento al 15% de humedad. La constante 1000 se empleó para calcular el rendimiento en toneladas por hectárea (t ha⁻¹) y 10000 representa la superficie de una hectárea en m².

Días a floración masculina (DFM). Se cuantificaron los días desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas se encontraran en antesis.

Asincronía floral (ASF). Se midió como la diferencia, en días, entre la floración femenina y la floración masculina.

Altura de planta (ALPTA). Se midió desde la base hasta la inserción de la espiga.

Datos de mazorca

Los datos de la mazorca se obtuvieron a partir de dos mazorca representativas de cada familia en cada parcela. En cada mazorca, se determinaron los siguientes datos:

Diámetro de mazorca (DMZ). Se midió en la parte media de la mazorca con ayuda de un vernier, expresado en centímetros.

Longitud de mazorca (LMZ). Se midió desde la base hasta el ápice de cada mazorca con ayuda de una regla, expresado centímetros.

Análisis de la información agronómica

El análisis de datos de la evaluación agronómica se realizó mediante un análisis de varianza (SAS Institute, 2004), en el que se probaron los efectos de las localidades, bloques dentro de localidades, y las interacciones con las localidades de evaluación. En el análisis de varianza, localidades, generaciones y la interacción generaciones \times localidades fueron considerados efectos fijos, y el resto como efectos aleatorios. Para el análisis de la información agronómica se utilizó el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijkl} = \mu + l_i + b_{j(i)} + f_k + g_l + lf_{ik} + lg_{il} + fg_{kl} + lfg_{ikl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde: Y_{ijkl} = Variable de respuesta; μ = Efecto de la media general; l_i = Efecto de la i -ésima localidad; $b_{j(i)}$ = Efecto del j -ésimo bloque dentro de la i -ésima localidad; f_k = Efecto de la k -ésima familia; g_l = Efecto de la l -ésima generación; lf_{ik} = Efecto de la interacción de la i -ésima localidad por la k -ésima familia; lg_{il} = Efecto de la interacción de la i -ésima localidad por l -ésima generación; fg_{kl} = Efecto de la interacción de la k -ésima familia por la l -ésima generación; lfg_{ikl} = Efecto de la i -ésima localidad por la k -ésima familia por la l -ésima generación; ε_{ijkl} = Error experimental.

En la comparación de medias, se utilizó como criterio de selección de las familias al valor superior a la $\mu + 2$ veces el error estándar.

Los datos de repeticiones, localidades, se utilizaron para realizar el análisis de la interacción familias \times localidades, mediante un análisis de dispersión grafica basado en el análisis de componentes principales (Yan y Tinker, 2006).

Etapas II. Efecto de la selección en contenido de carotenoides y provitamina A

Material genético

En el Cuadro 3.2., se presentan las familias empleadas en la cuantificación del contenido de carotenoides. Las familias evaluadas fueron aquellas representativas de los diferentes grupos raciales, con grano de mayor coloración amarilla.

Cuadro 3. 2. Grupo racial y área de adaptación de las familias de hermanos completos de maíz amarillo de Coahuila empleadas en la cuantificación del contenido de carotenoides.

Grupo racial	Familias	Amarillas	Área de adaptación (Altitud) [†]
Cónico Norteño	F016CN F13CN	2	Altura, Intermedia
Ratón	F8R F24R	2	Baja, Intermedia
Tuxpeño	F15T F19T	2	Baja, Intermedia
Tuxpeño Norteño	F3TN F16TN	2	Intermedia, Baja
Celaya	F5C	1	Intermedia
Total		9	

[†]Área de adaptación (Altitud en msnm) Bajo (< 1000), Intermedio (1001-1800), Transición (1801-2000) y Altura (> 2001).

Tamaño de muestra de grano

La muestra de granos empleada en la determinación fue obtenida de una familia a partir de polinizaciones controladas; de esta se seleccionaron 120 semillas al azar verificando que no presentaran daños físicos, así como presencia de enfermedades.

Análisis químicos

Determinación de carotenoides en harina de maíz por UPLC

Procedimiento

Una muestra de 30 semillas seleccionadas fue molida en un molino Cyclotec 1093 (Tecador, Sweden) para obtener harina con un tamaño de partícula de 0.5 mm.

Con la harina de 0.5 mm, se inició el proceso de extracción de carotenos, con base en el método descrito por Palacios-Rojas (2018), el cual consistió en dos etapas básicas: a) Curva de calibración, b) la extracción y cuantificación de carotenos.

a. Curva de calibración. La calibración consistió en realizar una prueba de análisis de extracción de carotenos para verificar el correcto funcionamiento del equipo.

Con una termobalanza, se determinó la humedad de cada muestra para llevar a cabo una estandarización de los pesos secos en relación con los pesos húmedos.

b. Extracción y cuantificación de carotenoides

Una vez que las muestras anteriores estuvieron listas, se centrifugaron a 3000 rpm durante 3 minutos. Con la ayuda de una pipeta Pasteur, se transfirió el sobrenadante (fase superior) a tubos limpios y etiquetados. Estos tubos se mantuvieron en hielo y bien tapados; los pasos anteriores se repitieron dos veces más y, al final, se obtuvo un volumen aproximado de 9 ml.

Posteriormente, en el Evaporador de Nitrógeno, se evaporaron las soluciones obtenidas (aproximadamente 90 minutos). Una vez culminada esta etapa, los tubos fueron cubiertos inmediatamente con sus respectivos tapones.

Transcurridas las primeras 12 horas aproximadamente, se precedió a reconstruir las muestras evaporadas mediante la adición de 500 µl de metanol: 1,2-dicloroetano (50:50). Posteriormente, se filtraron las muestras con acrodiscos de 0.22 µm, y el filtrado se recibió en viales etiquetados para su inyección al UPLC. Finalmente, al concluir el análisis en el cromatógrafo, se integraron cada uno de los picos de interés obtenidos en el cromatograma para determinar el área bajo la curva y se realizaron los cálculos con base a la ecuación obtenida a partir de la curva de calibración y reportar la concentración obtenida.

Determinación de la dureza del grano de maíz a través del índice de flotación en solución de azúcar comercial a través de la NMX-FF-034/1-SCFI-2002

Preparación de la solución de azúcar al 67 %.

En un matraz de 1.5 L se añadió un litro de agua purificada y se marcó con una línea el volumen ocupado. Posteriormente, se retiró el agua del matraz previamente marcada. En el matraz marcado, se agregaron 670 g de azúcar refinada, seguido de la adición de agua purificada hasta llegar a la marca realizada. Para disolver el azúcar, se cerró la boca del matraz con cinta adhesiva y se agitó vigorosamente. Debido a la incorporación del

azúcar en el agua, los volúmenes de los líquidos disminuyeron, por lo que se añadió nuevamente agua hasta la marca y se agitó para homogenizar la solución. Una vez disuelto el azúcar, el volumen total de la solución fue de 1 L exactamente.

Determinación del índice de flotación

De cada muestra, se seleccionaron 100 granos (sanos y completos) y registró el peso de cien granos. En un recipiente transparente de 1 L, se vertieron 500 mL de la solución previamente preparada. Las muestras pesadas de 100 granos se vaciaron en las soluciones y se agitaron (3 veces a la derecha y 3 veces a la izquierda) con ayuda de una cuchara. Posteriormente, se dejaron reposar por 1 minuto para permitir que los granos flotaran o se sumergieran. Después de transcurrido el tiempo indicado, se retiraron los granos flotantes con una cuchara y se depositaron en un colador, se contaron, y se determinó la dureza de la muestra de acuerdo con la clasificación establecida (Cuadro 3.3.).

Cuadro 3. 3. Clasificación del grano de maíz por su dureza de acuerdo con la NMX-FF-034/1-SCFI-2002.

Granos flotantes	Dureza
0-12	Muy duro
13-37	Duro
38-62	Intermedio
63-87	Suave
88-100	Muy suave

Determinación de color en escala L*a*b* utilizando el colorímetro Minolta CR-410

La primera fase consistió en la calibración del equipo colocando los colorímetros sobre los mosaicos blancos de calibración. Automáticamente el equipo hizo la calibración de acuerdo con valores predeterminados. Al término de la calibración, se mostraron en la pantalla principal los datos de la última lectura.

Los aros del colorímetro fueron situados sobre las bases de las cápsulas, y dentro de los aros se agregaron las muestras de grano. Sobre las muestras se colocaron los cuarzós, y finalmente, se colocaron los cabezales de las cápsulas. Posteriormente, sobre las cápsulas con las muestras, se colocó el colorímetro. En la pantalla aparecieron los valores obtenidos para L*, a* y b*.

Variables evaluadas

Cuantificación de carotenoides totales y β -caroteno

La cuantificación de carotenoides incluyó la determinación de Luteína, Zeaxantina, β -criptoxantina, β -caroteno, y los isómeros 13-cis-BC y 9-cis-BC; con la suma total de cada uno de estos se obtuvo el contenido total de carotenoides.

El contenido total de β -caroteno (Provitamina A) se estimó sumando la concentración de β -caroteno + 0.5 x (concentración α -criptoxantina + concentración β -criptoxantina + los isómeros 13-cis-BC, 9-cis-BC).

Índice de flotación

El índice de flotación (IF): se determinó cuantificando el número de granos que flotan en una solución de densidad específica (1.25 g mL^{-1}).

Color de grano

El color se determinó con un colorímetro Konica Minolta CR-410 colocando el colorímetro sobre las cápsulas con las muestras y la lectura se realizó automáticamente; en la pantalla aparecieron los valores obtenidos para los parámetros L^* , a^* y b^* .

Análisis de la información

El análisis de datos de la evaluación química se realizó mediante un análisis de componentes principales (R Core Team, 2024).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapa I. Efecto de la selección en características agronómicas

Comportamiento agronómico de las familias de maíz amarillo de Coahuila

Análisis de varianza

En el Cuadro 4.1, se muestran los cuadrados medios obtenidos del análisis de varianza (ANVA) para seis variables agronómicas.

La significancia en la interacción Fam x Loc ($P \leq 0.01$) indicó que algunas familias por su constitución genética, orígenes altitudinales y grupo racial responden de manera diferente en cada localidad de evaluación para RTO, DFM, ALPTA y LMZ, es decir, hubo variación en la expresión de la producción, la fenología, altura de la planta y las dimensiones de la mazorca.

La significancia de la interacción Gen x Loc ($P \leq 0.05$), para el RTO, DFM y ASF se asoció directamente con el efecto de la localidad y no con el efecto de las generaciones, donde no se encontró variación para para RTO y DFM para el efecto de las generaciones de selección.

La interacción Gen x Fam fue significativa ($P \leq 0.05$) solo para la variable RTO. Esta interacción indicó que al menos una familia presentó un comportamiento diferente en el RTO a través de las generaciones de selección, lo cual es parte de los resultados esperados, dado que las familias por su propia constitución genética pueden responder de forma diferente al efecto de la selección.

La variación entre las localidades de evaluación fue significativa ($P \leq 0.01$) en todas las variables evaluadas, la cual se atribuyó a las diferencias ambientales provocadas por la altitud y temperatura de cada localidad, ya que generan un nicho ecológico particular para el desarrollo de los cultivos.

Cuadro 4. 1. Cuadrados medios del análisis de varianza de los caracteres agronómicos en familias de hermanos completos de maíz amarillo nativo de Coahuila evaluados en 2022.

FV	GL	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ASF (d)	ALPTA (cm)	LMZ (cm)	DMZ (cm)
Localidades (Loc)	2	15.60 **	14,796.54 **	241.68 **	11,113.01 **	27.37 **	6.66 **
Bloques/Loc	3	4.16	6.25	2.49	1351.16 *	2.79	0.07
Familias (Fam)	17	10.16 **	79.34 **	3.59 *	2591.72 **	3.57 *	0.41 **
Generaciones (Gen)	1	0.86	35.85	9.37 *	1866.78 *	16.72 **	0.28 *
Fam x Loc	34	4.54 **	30.26 **	2.36	1106.64 **	3.86 **	0.08
Gen x Loc	2	8.99 *	42.39 *	7.16 *	129.12	5.13	0.07
Gen x Fam	17	3.85 *	17.76	2.21	224.53	2.34	0.07
Loc x Fam x Gen	34	3.62 **	11.49	3.12 *	397.75	2.96 *	0.07
Error	106	1.82	12.84	1.92	354.88	1.89	0.06
CV (%)		24.11	4.53	52.65	10.81	9.94	6.32

*, **, Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV = Fuentes de variación; GL = Grados de libertad; RTO = Rendimiento de grano; DFM = Días a floración masculina; ASF = Asincronía floral; ALPTA = Altura de la planta; LMZ = Longitud de mazorca; DMZ = Diámetro de la mazorca; CV (%) = Coeficiente de variación.

Entre las familias, se encontraron diferencias ($P \leq 0.01$) en las variables RTO, DFM, ALPTA y DMZ, mientras que para ASF y LMZ se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$); esta variación se asoció a las características *per se* de cada familia, mismas que están definidas por el origen poblacional, racial y ecológico de estas. Entre generaciones de selección, se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en DMZ, mientras que para ASF, DMZ y ALPTA se observaron diferencias ($P \leq 0.05$).

El efecto de la selección sobre las características agronómicas fue limitado, ya que solo se encontró diferencias ($P \leq 0.05$) en ASF, ALPTA y DMZ. Esto se debe a que la selección fue realizada directamente para color de grano e indirectamente para sanidad, por lo tanto, se buscó que las mazorcas presentaran grano de mayor coloración amarilla y buena sanidad. Coutiño *et al.* (2008), afirmaron que tres ciclos de selección recurrente de familias de hermanos completos permitieron incrementar el rendimiento de grano en sus poblaciones, sin modificar significativamente la floración ni la altura de planta, con respecto a la población original (C_0); tal como sucedió en el presente estudio, donde fue posible modificar la característica de interés (LMZ y DMZ), sin causar cambios en otras.

Características agronómicas de las familias por localidad de evaluación

En el Cuadro 4.2., se presentan los valores medios de las familias evaluadas en cada localidad para las tres características agronómicas de mayor variación en el estudio, y que por lo tanto permitieron discriminar el comportamiento de las familias.

En la evaluación, la diversidad entre las familias mostró el RTO más alto (8.3 t ha^{-1}) para la F15T en El Mezquite, mientras que F23R y F19T registraron el rendimiento más bajo (2.4 t ha^{-1}) en el mismo ambiente y F23R también en General Cepeda. Esta variación implicó una diferencia de hasta 6 t ha^{-1} entre la familia de mayor y la de menor potencial, y que se asocia con el origen racial y el componente genético de cada familia.

Los DFM indicaron que la F16TN fue la familia más tardía (104.5 d) en El Mezquite, mientras que F22R la más precoz (61.8 d) en General Cepeda; la F15T de mayor rendimiento mostró el efecto general de las localidades sobre la floración, ciclo tardío

Cuadro 4. 2. Valores medios de rendimiento y características agronómicas de las familias mejoradas para color de grano evaluadas en diferentes localidades del sureste de Coahuila en 2022.

Familias	El Mezquite, N.L.			Buenavista, Coah.			General Cepeda, Coah.		
	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)	RTO (t ha ⁻¹)	DFM (d)	ALPTA (cm)
F15T [†]	8.3 **	86.0	193.8 **	6.2 *	76.0	192.5 *	6.5 **	63.3	186.5 **
F24R	7.0 **	92.8	176.8 **	5.0	82.8 **	182.0	7.6 **	68.5 **	195.8 **
F13CN	6.9 **	96.0 *	190.3 **	6.8 **	76.0	171.8	7.6 **	64.8	188.3 **
F22R	6.2 **	90.0	132.8	6.0	72.0	161.8	4.6	61.8	152.5
F8R	5.9 **	89.8	154.3	6.2 *	74.3	191.5 *	6.8 **	64.3	171.3
F16TN	5.9 **	104.5 **	193.3 **	6.2 *	75.0	189.0	6.9 **	62.0	173.5
F9T	5.6 *	94.5	172.8 **	5.2	79.3 **	214.0 **	6.6 **	68.8 **	203.0 **
F25R	5.3	89.8	153.3	5.1	73.8	191.8 *	4.9	62.0	168.0
F27R	5.1	94.3	163.5	5.8	76.0	141.8	4.7	62.3	148.0
F21T	5.1	93.5	159.0	7.5 **	78.5 *	181.8	5.8	65.0	174.8
F10T	5.0	98.3 **	166.8 *	6.7 **	81.3 **	196.3 **	5.7	67.0 **	179.5
F18T	4.9	96.8 **	155.8	5.3	77.8	183.0	6.3 *	66.5 *	168.3
F11T	4.5	97.8 **	146.8	5.9	79.3 **	205.3 **	6.3 *	67.8 **	180.5
F3TN	3.7	93.5	144.3	5.2	70.5	191.0 *	5.1	62.8	185.5 *
F1T	3.7	94.8	159.3	6.4 **	80.3 **	198.0 **	3.4	69.0 **	160.3
F5C	3.6	91.3	138.5	5.9	80.3 **	221.8 **	6.3 *	69.0 **	192.8 **
F23R	2.4	96.3 **	142.8	5.2	77.8	139.0	2.4	68.0 **	139.0
F19T	2.4	94.3	146.8	6.3 **	78.0 *	176.8	6.8 **	68.3 **	218.5 **
Media	5.1	94.1	160.6	5.9	77.1	184.9	5.8	65.6	177.0
EE	0.4	1.0	4.4	0.2	0.8	5.1	0.3	0.7	4.5

** = Valores superiores a la $\mu + 2$ EE, RTO = Rendimiento de grano; DFM = Días a floración masculina; ALPTA = Altura de planta; [†] En el identificador de familias, los últimos dígitos indican el grupo racial de procedencia T = Tuxpeño; R = Ratón; CN = Cónico Norteño; TN = Tuxpeño Norteño; C = Celaya; EE = Error estándar.

en El Mezquite (86 días), y precoz en Buenavista (76 días) y General Cepeda (63.3 días). Entre las localidades, El Mezquite fue una localidad de transición con condiciones ambientales menos adversas que permiten que el ciclo biológico sea más prolongado que en General Cepeda donde se presentó una mayor temperatura y que provoca ciclos biológicos precoces; la temperatura alta en esta última localidad provoca una importante presencia de plagas, particularmente de gusano cogollero, que es una de las limitantes de la producción.

En ALPTA, en El Mezquite se observó una menor altura, mientras que Buenavista y General Cepeda fueron similares; entre las familias se observó variación para la APTA a través de las localidades; sin embargo, se observó una relación entre las familias de mayor RTO (F15T, F24R, F13CN) con mayor APTA en El Mezquite y en General Cepeda.

Con base en el valor medio del rendimiento por localidad, se encontraron cuatro familias que mostraron rendimiento superior en cada localidad de evaluación y que por lo tanto se consideraron sobresalientes para esta característica: F15T, F13CN, F8R y F16TN.

La expresión de las familias se consideró destacada dada su expresión a través de las localidades e importante en la selección de genotipos con capacidad de adaptación a las condiciones prevalecientes en la región.

Las familias mencionadas también mostraron la importancia de los diferentes grupos raciales dentro de la diversidad regional y su capacidad de producción en los diferentes nichos ecológicos regionales, encontrando que familias de diferentes poblaciones y grupos raciales mostraron un comportamiento deseable para la producción de grano.

Los días a floración masculina permitieron identificar a cinco familias precoces (61 a 64 d) para la localidad de General Cepeda, estas familias corresponden a los grupos raciales Ratón (F22R, F25R, F27R), Tuxpeño Norteño (F16TN) y Cónico Norteño (F13CN), y pueden ser utilizadas como fuente de precocidad en un programa de mejoramiento genético, característica deseable ante las condiciones de escasa precipitación.

Los DFM indicaron que en El Mezquite se registró un ciclo tardío, intermedio en Buenavista y precoz en General Cepeda, lo cual coincidió con el gradiente altitudinal, el cual causa diferencias en las temperaturas medias y por lo tanto efectos en la fenología de los cultivos. En particular, El Mezquite presentó una temperatura media mensual inferior en comparación con General Cepeda, lo que provocó que, en esta última localidad, el ciclo

biológico del cultivo fuera menor. Es importante mencionar que la mayoría de las familias evaluadas pertenecen a poblaciones de altitudes bajas e intermedias; en este sentido, Pecina-Martínez *et al.* (2009) mencionaron que, en entornos de transición y valles altos, factores como temperaturas bajas, altitudes superiores y fotoperiodos más cortos, conduce a un mayor desarrollo vegetativo de la planta y a ciclos fenológicos más tardíos, lo cual coincidió parcialmente con los resultados de este estudio.

Los resultados mostraron que El Mezquite fue una localidad con restricciones para la producción, debido al menor rendimiento, mayor asincronía y menor altura de la planta; no obstante, cabe destacar que, a pesar de estas restricciones, esta localidad de transición comúnmente suele mostrar mejor capacidad agrícola para la producción.

Análisis de la interacción de las familias x localidades de evaluación

La Figura 4.1. proporciona una herramienta valiosa para identificar aquellas familias con adaptación específica a las condiciones de las localidades de evaluación. Esta Figura muestra la dispersión de las familias en las localidades de evaluación, El Mezquite (MEZ), General Cepeda (GC) y Buenavista (BV), explicando el 77.8 % de la variación total para el rendimiento de grano. En el eje horizontal inclinado se muestra el rendimiento promedio de las familias, mientras que en el eje vertical corresponde a la respuesta específica de las familias en las diferentes localidades de evaluación (Yan y Tinker, 2006).

En eje horizontal inclinado se muestran los efectos promedio, similares a los efectos de aptitud combinatoria general (ACG), mientras que en el vertical se evalúa la respuesta a ambientes de prueba específicos, similar a los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE). Las localidades de evaluación representan los probadores de las familias. Por lo tanto, las familias cercanas al eje horizontal (F13CN-M, F8R-M, F10T, F27R-M, F16TN-M y F15T) se consideran estables de mayor rendimiento de grano a través de las distintas localidades.

En la evaluación, la expresión de las localidades fue diferente a la esperada, donde El Mezquite y General Cepeda se encontraron asociados, a pesar de ser localidades ambientalmente contrastantes y por lo tanto con diferente aptitud para la producción de grano; ambos, fueron independientes del comportamiento con respecto a Buenavista. La explicación a este fenómeno se encontró en la localidad de siembra del experimento en El Mezquite, el cual estuvo expuesto a condiciones de riego por debajo de lo normal;

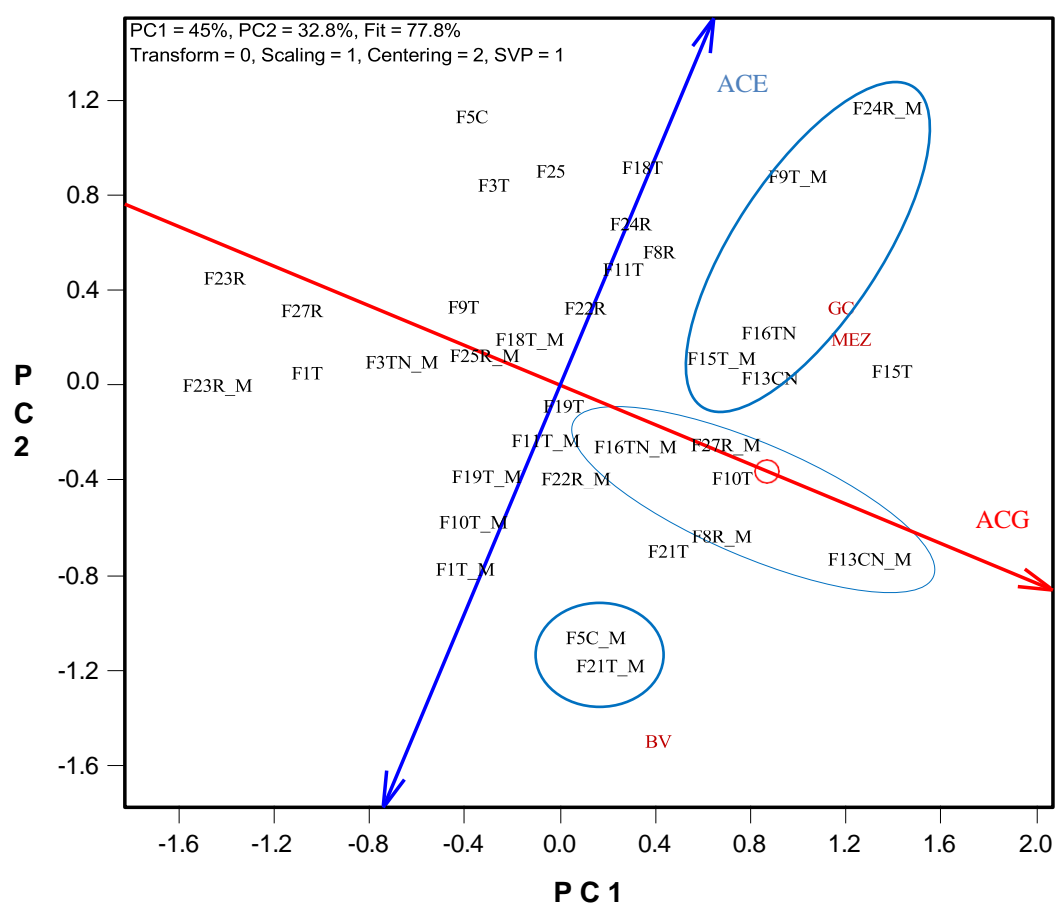


Figura 4. 1. Interacción Familias x Localidades de evaluación con base en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2) evaluadas en tres localidades en 2022. GC = General Cepeda; MEZ= El Mezquite; BV = Buenavista; En el identificador de familias los últimos dígitos corresponden al grupo racial: C = Celaya; CN = Cónico Norteño; R = Ratón; T = Tuxpeño; TN = Tuxpeño Norteño, la versión mejorada de la familia está indicada por _M.

causando un efecto de sequía y que redujo considerablemente el rendimiento, siendo similar al efecto provocado por el efecto ambiental en General Cepeda, donde normalmente las condiciones son adversas.

En el caso de Buenavista, contrastó del resto dado el manejo agronómico del experimento, de tal forma que los valores normales se consideran los de General Cepeda y Buenavista, mientras que el caso de El Mezquite, estuvieron por debajo de lo esperado dadas sus normales condiciones para la producción.

En la evaluación (Figura 4.1.), se identificaron a dos grupos de familias de acuerdo con su adaptación: El primero, con adaptación a El Mezquite y General Cepeda, con seis familias (F16TN, F15T-M, F15T, F13CN, F9T_M y F24R_M) incluyendo las familias originales y mejoradas (M) y el segundo grupo adaptado a la localidad de Buenavista con dos familias (F5C-M y F21T-M).

Etapas II. Efecto de la selección en el contenido de carotenoides y provitamina A

Contenido de carotenoides en grano de maíz amarillo de Coahuila

En el Cuadro 4.3., se presenta el contenido de carotenoides totales y provitamina A determinado en harina por el método de UPLC en laboratorio de nueve familias de maíz amarillo de Coahuila evaluadas en 2022.

Los carotenoides totales entre las diferentes familias mostraron una variación de 1.97 en generación 1 (G1) a 8.49 mg kg⁻¹ en generación 2 (G2 o -M), entre esta diversidad, F5C-M, F16TN-M, F19T-M y F24 presentaron los mayores valores en la G2; sin embargo, su contenido total es al menos 55 % menor que la línea CML-297 de CIMMYT, y 45 % menor con respecto a la meta establecida por Harvest-Plus (15 mg kg⁻¹) para el desarrollo de un material genético útil para proveer Provitamina A.

Si bien es cierto que el contenido de los diferentes carotenoides en las familias fueron bajos (1.97 mg kg⁻¹) en la G1, entre la diversidad existen valores máximos (8.49 mg kg⁻¹) en la generación 2 son similares a los determinados en el testigo IMIC-100 (10.43 mg kg⁻¹), excepto para el contenido de Provitamina A, donde las familias mostraron valores inferiores (1.48 mg kg⁻¹) comparados con testigo CML-297 (7.94 mg kg⁻¹); estos resultados mostraron que existe diversidad en el contenido de carotenoides en las familias;

Cuadro 4. 3. Contenido de carotenoides totales y provitamina A de nueve familias de hermanos completos de maíz amarillo de Coahuila evaluadas en 2022.

Familias	Luteína (mg kg ⁻¹)		Zeaxantina (mg kg ⁻¹)		β -criptoxantina (mg kg ⁻¹)		13-cis-BC (mg kg ⁻¹)		β -caroteno (mg kg ⁻¹)		9-cis-BC (mg kg ⁻¹)		Provitamina A		Carotenos Totales	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
F5C [†]	0.83	1.23	1.22	1.64	0.45	3.65	0.26	0.40	0.39	0.94	0.30	0.63	1.18	3.79	3.45	8.49
F16TN	0.31	1.41	0.57	2.03	1.25	1.99	0.32	0.49	0.66	1.18	0.46	0.69	2.06	3.35	3.56	7.78
F24R	0.67	0.44	1.09	0.81	2.88	1.25	0.44	0.50	1.09	1.14	0.79	0.70	3.75	2.96	6.95	4.84
F19T	0.38	0.68	0.58	1.17	0.49	1.99	0.32	0.57	0.61	1.55	0.40	0.89	1.57	4.00	2.79	6.84
F3TN	0.28	0.57	0.50	0.89	1.14	1.24	0.46	0.42	1.16	0.95	0.74	0.52	2.93	2.51	4.28	4.59
F8R	0.18	0.25	0.35	0.48	1.10	2.15	0.29	0.36	0.49	0.74	0.39	0.55	1.71	2.72	2.80	4.53
F15T	0.31	0.15	0.54	0.32	1.31	1.26	0.36	0.34	0.75	0.67	0.53	0.52	2.30	2.16	3.80	3.26
F13CN	0.06	0.07	0.16	0.19	0.71	1.22	0.32	0.45	0.62	1.17	0.40	0.63	1.70	2.87	2.28	3.73
F016CN	0.06	0.17	0.18	0.35	0.51	1.04	0.27	0.40	0.47	0.88	0.48	0.75	1.47	2.56	1.97	3.59
Media	0.34	0.55	0.58	0.88	1.09	1.75	0.34	0.44	0.69	1.02	0.50	0.65	2.07	2.99	3.54	5.29
CML-297	Testigo	2.43		3.23		9.59		0.59		1.69		0.87		7.94		18.4
IMIC-100	Testigo	1.7		2.94		3.67		0.42		1.07		0.63		3.95		10.4

[†]En el identificador de familias, los últimos dígitos indican el grupo racial de procedencia; Cónico Norteño (CN); Tuxpeño Norteño (TN); Ratón (R); Tuxpeño (T); Celaya (C); G1 = Generación 1; G2 o -M = Generación 2.

evaluadas pero que el contenido es menor a los testigos, aunque susceptible de mejora a través de diferentes metodologías. Considerando la diferencia entre el valor medio de la primera y la segunda generación en cada uno de los carotenoides determinados (Cuadro 4.3.), se encontraron mejoras con base en la selección visual realizada para el color del grano: tres elementos destacaron por sus

incrementos, los carotenoides totales en 1.75 mg kg^{-1} , la Provitamina A con 0.92 mg kg^{-1} y la β -criptoxantina en 0.66 mg kg^{-1} ; en sentido contrario, 13-cis-BC y 9-cis-BC presentaron las menores ganancias con 0.10 y 0.15 mg kg^{-1} , respectivamente; en promedio, para cada carotenoide las ganancias fueron positivas lo cual demostró el avance genético para el contenido de carotenoides y la posibilidad de mejora mediante selección visual. Sin embargo, se identificó un grupo de familias (F24R, F3TN y F15T), en el cual no se logró ganancias en la generación 2, para todos los carotenoides determinados.

Al realizar la comparación entre las familias (generación 1 y generación 2), se encontraron diferencias; en el caso de la Luteína y Zeaxantina, las modificaciones fueron desde -0.23 en la F24R hasta 1.1 mg kg^{-1} en la F16TN, y -0.28 a 1.46 mg kg^{-1} en las mismas familias, respectivamente, evidenciando tanto pérdidas como ganancias. En este sentido, para ambos carotenoides (Luteína y Zeaxantina) la familia F16TN en la generación 2, fue quien mayor incremento mostró entre las generaciones, aunque el mayor contenido de carotenoides lo presentó F5C (8.49 mg kg^{-1}) en la generación 2.

En cuanto al contenido de β -criptoxantina, las modificaciones por la selección fueron más amplias que en Luteína y Zeaxantina, ya que las diferencias entre las generaciones fueron de -1.63 en la F24R hasta 3.2 mg kg^{-1} en la F5C-M. La familia F5C-M destacó por su incremento en la concentración a través de las generaciones de selección. Dhliwayo *et al.*, (2014), en tres ciclos de selección recurrente, encontraron respuestas por ciclo de selección para carotenoides provitamina A, valores desde 0.53 mg kg^{-1} para β -caroteno y hasta 1.73 mg kg^{-1} para β -criptoxantina en sus poblaciones. Además, observaron que la selección para aumentar la concentración total de provitamina A en promedio resultó en mayores incrementos en β -criptoxantina que en el β -caroteno en todas las poblaciones.

En los β -carotenos la variación de las familias fue de 0.39 a 1.55 mg kg^{-1} , y el efecto de la selección permitió incrementar hasta 0.94 mg kg^{-1} en la familia F19 en la generación 2; por otro lado, en cuanto a la Provitamina A, la variación fue de 1.17 a 4.0 mg kg^{-1} entre

las familias, logrando un incremento de hasta 2.61 mg kg^{-1} en la F5C-M. Este último posicionó a la familia F5C-M como aquella que experimentó el mayor cambio en el contenido de carotenoides totales. De acuerdo Menkir and Maziya (2004), el β -caroteno está más influenciado por el genotipo que por el medio ambiente.

Finalmente, los carotenoides totales presentaron una variación de 1.97 a 8.49 mg kg^{-1} , donde se observó que la selección visual para color de grano permite mejorar el contenido de carotenoides; sin embargo, la respuesta a la selección dependerá del carotenoide y del genotipo. Según Kljak *et al.* (2014), el contenido de carotenoides en granos de maíz puede variar significativamente, desde valores cercanos a 0 mg kg^{-1} en granos blancos hasta 30 mg kg^{-1} en los granos de color amarillo-anaranjado.

En la evaluación, tres familias destacan entre la diversidad del maíz nativo evaluado por su contenido de carotenoides en comparación con el resto: F5C-M, F16TN-M, F19T-M (Cuadro 4.3.). Estas familias mostraron una respuesta positiva a la selección en cada uno de los carotenoides determinados, esto corrobora la posibilidad de mejorar el contenido general de carotenoides en el grano de maíz amarillo mediante la selección visual a través de estructuras familiares. En el sentido opuesto, dos familias (F24R-M y F15T-M) mostraron efectos negativos a la selección del color del grano, con una disminución en el contenido de cada carotenoide en comparación con la generación anterior (Cuadro 4.3.); estos resultados mostraron que, aunque la selección puede emplearse para mejorar el contenido de carotenoides, la respuesta a esta dependerá del genotipo. Khamkoh *et al.* (2019) también lograron mejorar la luteína, la zeaxantina, el β -caroteno y los carotenoides totales, mediante la selección recurrente basada en la observación visual de los caracteres.

Dureza y coloración del grano en familias de maíz amarillo de Coahuila en dos generaciones de selección visual

En el Cuadro 4.4., se presentan los valores asociados con la dureza y la coloración del grano, cuantificados a través del índice de flotación y por el método de colorimetría.

Entre la diversidad del maíz nativo amarillo estudiada se encontró que la dureza de los granos fue de duros y muy duros (0 – 37 % de flotación); sin embargo, se observaron diferentes comportamientos: familias que disminuyeron su dureza en la generación 2 (F8R, F16CN, F16TN, F5C) y otros, cuya dureza aumento (F13CN, F3TN, F15T, F19T y F24R); estos resultados se asociaron con la composición del endospermo, donde debido a la diversidad de las familias nativas fue posible que el grano empleado en la evaluación dependiera de la predominancia de los alelos participantes en la polinización, también es posible que las condiciones ambientales condicionen el tipo de endospermo y la dureza del grano.

Los resultados obtenidos coincidieron con los obtenidos por Figueroa *et al.* (2013), donde al evaluar la calidad del grano de diferentes razas de maíz nativo (Cónico, Tuxpeño y Celaya) encontraron granos duros y muy duros. De acuerdo con Di Martino *et al.* (2003), el color de los granos de maíz es una característica intrínseca del genotipo que puede verse afectada por las condiciones ambientales.

En este estudio como en el de Saenz *et al.* (2020) los mayores contenidos de carotenoides fueron observados en genotipos con mayor dureza de grano, excepto en F24R en comparación con los más suaves.

Cuadro 4. 4. Índice de flotación y la coloración del grano obtenida mediante Hunter Lab en las Generaciones 1 y 2 de nueve familias evaluadas en 2022.

Familias	Flotación		Color del grano									
			L*		a*		b*		H _{ab}		C _{ab}	
	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2	G1	G2
F16TN†	8.5	36.5	65.3	64.5	5.5	5.4	35.8	30.0	81.3	79.9	36.2	30.5
F13CN	25.5	2.0	68.0	64.9	2.0	3.8	28.6	31.8	86.0	83.2	28.7	32.0
F5C	6.0	25.0	62.3	64.1	5.8	8.2	30.9	31.1	79.3	75.3	31.4	32.2
F016CN	11.5	21.5	68.0	65.6	1.8	3.4	32.6	35.0	86.8	84.5	32.6	35.2
F3TN	19.5	5.0	63.8	62.4	4.0	5.7	32.6	28.8	83.0	78.9	32.8	29.4
F8R	15.5	16.5	62.0	63.4	3.8	3.9	30.1	28.7	82.8	82.3	30.3	29.0
F15T	11.0	7.5	63.8	63.9	4.8	3.0	34.8	29.9	82.2	84.3	35.1	30.1
F19T	5.5	3.5	66.1	60.4	3.9	8.7	32.2	34.3	83.1	75.6	32.4	35.4
F24R	4.0	1.5	59.6	65.9	7.2	7.4	32.7	36.3	77.5	78.5	33.5	37.0
Media	11.9	13.2	64.3	63.9	4.3	5.5	32.3	31.8	82.4	80.3	32.6	32.3

†En el identificador de familias, los últimos dígitos indican el grupo racial de procedencia; Cónico Norteño (CN); Tuxpeño Norteño (TN); Ratón (R);

Tuxpeño (T); Celaya (C); G1 = Generación 1; G2, -M = Generación 2.

En la evaluación de la coloración del grano, se encontró con base en la luminosidad del parámetro (L) que la coloración es clara con variaciones entre 59.6 a 68.0, las familias F13CN y F016CN en G1 presentaron la luminosidad más alta con 68.0, entre la diversidad estudiada. En el parámetro a^* , los valores varían entre 1.8 a 8.7, siendo la familia F19T-M con el valor más alto (8.7), que indicó que fue la que presentó tonalidades más rojas. En cuanto a las determinaciones del parámetro b^* , se definieron tonalidades amarillas, que tuvieron una variación entre 28.6 y 36.3, siendo la familia F24R-M con el valor más alto, lo cual indicó que fue la que presentó la mayor tonalidad amarilla. Los valores altos en H_{ab} indicaron colores más saturados y brillantes, con la F24R-M quien presentó el valor más alto (36.3), mientras que, los valores altos en C_{ab} indicaron colores de mayor saturación y brillo en las familias, de la misma manera, F24-M presentó el valor más alto (37.0), respectivamente.

Según Weber (1987), el color de los granos está estrechamente relacionado con el contenido de carotenoides en el endospermo, ya que estos pigmentos se encuentran principalmente en la parte carnosa del mismo. Por otro lado, Kljak *et al.* (2014), propusieron modelos de estimación del contenido de carotenoides basados en mediciones de la dimensión b (eje amarillo-azul) en harina.

Análisis de componentes principales en la determinación del contenido de carotenoides

En la Figura 4.2., se presenta el análisis de componentes principales de tres variables evaluadas en laboratorio, carotenoides totales (CarotenosT), provitamina A (ProA) e índice de flotación (IF). La figura muestra la dispersión de las familias con respecto a las variables evaluadas.

En el análisis, los dos componentes principales explican el 96.59 % de la variación total acumulada en las variables originales. El análisis mostró una relación positiva entre los carotenos totales y la provitamina A, lo que sugiere una relación directa entre estas dos variables en el maíz amarillo. No obstante, se encontró una correlación baja entre el índice de flotación y las dos variables antes mencionadas. Estos resultados son diferentes a lo reportado por Saenz *et al.* (2020), donde al evaluar el efecto de la dureza del grano de

maíz sobre su color, encontraron una correlación negativa entre el índice de flotación y carotenoides totales.

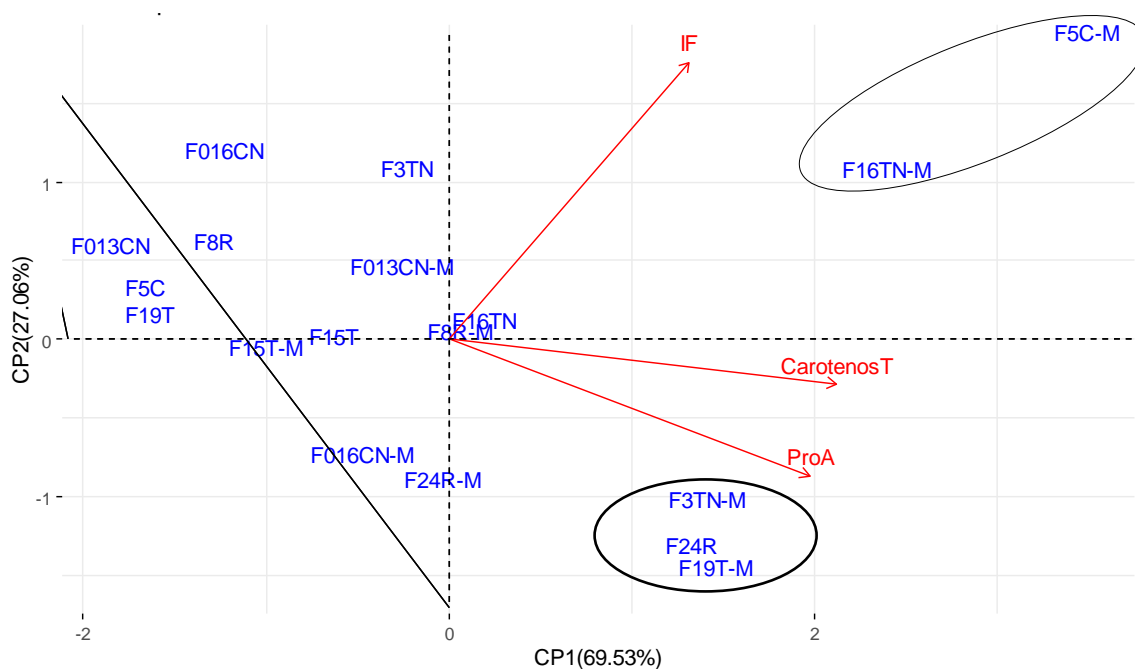


Figura 4. 2. Dispersión gráfica de la interacción entre las variables carotenoides totales (Carotenos T), provitamina A (ProA) e índice de flotación (IF) en familias de maíz amarillo nativos de Coahuila, 2022 con base en los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2). En el identificador de familias los últimos dígitos corresponden al grupo racial: C = Celaya; CN = Cónico Norteño; R= Ratón; T = Tuxpeño; TN = Tuxpeño Norteño; -M en el identificador de familias corresponde a la versión mejorada.

En el análisis se identificaron dos grupos de familias relacionadas con estas variables: el primero, relacionado con la variable índice de flotación, se encuentran dos familias (F5C-M y F16TN-M), que pertenecen a los grupos raciales Celaya y Tuxpeño Norteño y que son los que presentaron mayor contenido de carotenoides totales; el segundo grupo, relacionado con las variables carotenoides totales y Provitamina A con tres familias, se encuentran los grupos raciales Tuxpeño Norteño (F3TN-M), Ratón (F24R) y Tuxpeño (F19T-M) con contenido de carotenoides totales menores al grupo anterior y índice de flotación más bajos, respectivamente.

CONCLUSIONES

Los resultados indicaron que, a través de dos generaciones de selección visual para color de grano a través de familias de hermanos completos, no se observaron cambios significativos en la mayoría de las características agronómicas de las familias evaluadas.

Los resultados mostraron que, entre las familias de las poblaciones estudiadas, aquellas de mayor color amarillo en el grano, la concentración de carotenoides totales es baja, particularmente la provitamina A, en comparación con los genotipos desarrollados para tal característica; sin embargo, se demostró que, a través de una selección visual para el color de grano, de familias de hermanos completos, es posible mejorar la concentración de carotenoides.

En la mejora del contenido de carotenoides en maíces nativos, es necesario definir una estrategia de mejoramiento a partir de un genotipo con una elevada concentración de carotenoides.

REFERENCIAS

- Ashokkumar V., Flora G., Sevanan M., Sripriya R., Chen W. H., Park, J. H., & Kumar, G. (2023). Technological advances in the production of carotenoids and their applications a critical review. *Bioresource technology* 367(3): 128-215.
- Bernardo R. (2020). Breeding for Quantitative Traits in Plants. Stemma Press. 3rd. Edition: MN, USA. 422 p.
- Blessing C. W., Becher J., Daimler R. J. (1963). Carotenoids of corn and sorghum. 5. Distribution of xanthophylls and carotenes in hand-dissected and dry-milled fractions of yellow dent corn. *Agricultural and food Sciences Chemistry*. 40: 582-586.
- Borrás L. (2020). Maíz Flint: Producción sustentable y calidad del grano. Facultad de Ciencias Agrarias, UNR, y CONICET.
- Charalampia D., & Koutelidakis A. E. (2017). From pomegranate processing by-products to innovative value-added functional ingredients and bio-based products with several applications in food sector. *Biotechnology* 3(025): 210.
- CONABIO, Razas de maíz de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2022). Disponible en línea: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>. (Consulta diciembre 2022).
- Coutiño E. B., Sánchez G. G., Vidal M. V. A. (2008). Selección entre y dentro de familias de hermanos completos de maíz en Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(2): 115-123.
- Dhliwayo T., Palacios R. N., Crossa J., & Pixley K.V. (2014). Effects of S₁ recurrent selection for provitamin A carotenoid content for three open-pollinated maize cultivars. *Crop Science* 54: 2449-2460.
- Di Martino, A. M., Robutti, J. L., & Cirilo, A. G. (2003). Una carta cromática permite evaluar el efecto del manejo del cultivo sobre el color del grano de maíz colorado duro. *Revista de Tecnología Agropecuaria* 8: 14-15.

- Egesel C. O., Wong J. C., Lambert R. J., Rocheford T. R. (2003). Combining ability of maize inbreds for carotenoids and tocopherols. *Crop Science* 43: 818-823.
- Figueroa C. J. D., Narváez G. D. E., Mauricio S. A., Taba S., Gaytán M. M., Véles M. J. J., Rincón S. F., & Aragón C. Flavio. (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36 (Supl. 3-a): 305-314.
- Grotewold E. (2006). The genetics and biochemistry of floral pigments. *Annual Review of Plant Biology* 57: 61-80.
- Hallauer A. R., Russell W. A., Lamkey K. R. (1988). Corn breeding. Sprague G.F, Dudley J.W. (eds) *Corn and corn improvement*, 18, 463-564. Madison, WI: *American Society of Agronomy*, USA.
- Harjes C. E., Rocheford T. R., Bai L. I., Brutnell T. P., Bermudez K. C., Sowinski S. G., Stapleton A. E., Vallabhaneni R., Williams M., Wurtzel E. T., Yan J., Buckler E. S. (2008). Natural genetic variation in lycopene epsilon cyclase tapped for maize biofortification. *Science* 319: 330-333.
- Harvest-Plus. 2021. Vitamin A Maize. Disponible en Línea: <https://www.harvestplus.org/crop/vitamin-a-maize/>
- Horne D. W., Eller M. S., Holland J. B. (2016). Responses to recurrent index selection for reduced *Fusarium* ear rot and lodging and for increased yield in maize. *Crop Science* 56: 85-94.
- Khamkoh W., Ketthaisong D., Lomthaisong K., Lertrat K., Suriharn B. (2019). Recurrent selection method for improvement of lutein and zeaxanthin in orange waxy corn populations. *Australian Journal of Crop Science* 13: 566-573.
- Kljak K., Grbesa D., Karolyi D. (2014). Reflectance colorimetry as a simple method for estimating carotenoid content in corn grain. *Journal Cereal Science* 59 (2): 109-111.
- Menkir A., Maziya D. B. (2004). Influence of genotype and environment on β -carotene content on tropical yellow endosperm maize genotypes. *Maydica* 49:313–318.
- Molina G. (1992). *Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa*. AGT Editor. México. 349 p.

- NMX-FF-034/1-SCFL (2002). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereales-parte I: maíz blanco para proceso de alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-especificaciones y métodos de prueba. Secretaria de Economía, México; 18 p.
- OMS. (2009). Vitamin A deficiency, World Health Organization. Disponible en línea: <https://www.who.int/data/nutrition/nlis/info/vitamin-a-deficiency>.
- Ortega P. R. A., J. J. Sánchez G., F. Castillo G., J. M. Hernández C. (1991). Estado actual de los estudios sobre maíces nativos en México. *In: Avances en el Estudio de los Recursos Fitogenéticos de México*. Ortega P. R. A. O. Palomino G. H., Castillo F. G, González V., A. H, Livera M. M. (eds). SOMEFI. Chapingo, México. pp:161-185.
- Ortiz D., Rocheford T. R., Ferruzzi M. G. (2016). Influence of temperature and humidity on the stability of carotenoids in biofortified maize (*Zea mays* L.) genotypes during controlled postharvest storage. *Journal Agricultural Food Chemistry* (64): 2727-273.
- Palacios-Rojas N. (2018). Calidad nutricional e industrial de maíz: Laboratorio de Calidad Nutricional de Maíz “Evangalina Villegas” CDMX, México: CIMMYT. 160 p.
- Pecina-Martínez J. A., Mendoza-Castillo M. C., López-Santillán J. A., Castillo-González F., & Mendoza-Rodríguez M. (2009). Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia* 43(7): 681-694.
- Preciado-Ortiz R. E., García-Lara S., Ortiz-Islas S., Ortega-Corona A., & Serna-Saldívar S. R. (2013). Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crops Research* 142: 27-35.
- R Core Team 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rao A. V., & Rao L. G. (2007). Carotenoids and human health. *Pharmacological research* 55(3): 207-216.

- Rodríguez A. D. B., Kimura M. (2004). Harvest Plus handbook for carotenoid analysis. Washington, DC y Cali. 58 p.
- SADER. 2020. Maíz blanco o amarillo es cultivo de tradición y desarrollo. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Disponible en línea: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-blanco-o-amarillo-es-el-cultivo-de-tradición-y-desarrollo>. (Consulta junio 2020).
- Saenz E., Abdala L. J., Borrás L., Gerde J. A. (2020). Maize kernel color depends on the interaction between hardness and carotenoid concentration. *Journal of Cereal Science* 91: 102-901.
- SAS Institute (2004). SAS/STAT ® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
- Senete C. T., Guimarães P. E., Paes M. C., Souza J. C. (2011). Diallel analysis of maize inbred lines for carotenoids and grain yield. *Euphytica*, 182:395-404.
- Serna-Saldívar S. O. (2010). Cereal Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 747.
- Serna-Saldívar S. O., Amaya-Guerra C. A. (2008). El papel de la tortilla nixtamalizada en la nutrición y la alimentación. *In: Nixtamalización del Maíz a la Tortilla. Aspectos Nutrimientales y Toxicológicos*. M. E. Rodríguez-García, S. O. Serna-Saldívar, F. Sánchez-Sinencio (eds). Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. pp:105-151.
- Serna-Saldívar S. O., Gutiérrez-Urbe J. A., Mora-Rochin S., & García-Lara S. (2013). Potencial nutraceutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión. *Revista Fitotecnica Mexicana* 36 (Supl. 3-a): 295-304.
- SIAP. 2022. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. (Consulta diciembre 2022).
- Souza C. L. (1999). Recurrent selection and heterosis. *In: The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops*. J. G. Coors, S. Pandey (eds). CIMMYT. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. pp:247-253.

- Suwarno W.B., Pixley K.V., Palacios R. N., Kaeppler S.M., & Babu R.S. (2014). formation of heterotic groups and understanding genetic effects in a provitamin A biofortified maize breeding program. *Crop Science* 54: 14-24.
- Turrent-Fernández A., Wise T. A., Garvey E. (2012). Factibilidad de alcanzar el potencial productivo de maíz de México. *Woodrow Wilson International Center for Scholars*. 36 p.
- Vasal S. K., Singh N. N., Dhillon B. S., Patil S. J. (2004). Population improvement strategies for crop improvement. In: Jain H. K., Kharkwal M. C. (eds). *Plant breeding mendelian to molecular approaches*. Narosa Publishing House, New Delhi, India. pp 391-406.
- Warburton M. L., J. C. Reif., M. Frisch, M. Bohn, C. Bedoya, X. C. Xia., J. Crossa, J. Franco, D. Hoisington, K. Pixley, S. Taba, A. E. Melchinger. (2008). Trends in genetic diversity in CIMMYT non-temperate maize germplasm. *Crop Science* 48:617-624.
- Weber E. (1987). Carotenoids and tocols of corn grain determined by HPLC. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 64: 1129-1134.
- West K. P., Darnton H. I. (2008). Vitamin A deficiency. In *Nutrition and health in developing countries*, 2nd. Edition: Semba, R. D., Bloem, M. S., (eds), Humana Press: Totowa, New Jersey, pp: 377-434.
- Yan W., and Tinker N. A. (2006). Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian Journal Plant Science* 86: 623–645.