

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Estudio del Comportamiento Agronómico y Rendimiento de Grano en
Germoplasma de Maíz Mejorado con Capacidad para Sintetizar Antocianinas

Por:

SANDRA PATRICIA PÉREZ GODÍNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Estudio del Comportamiento Agronómico y Rendimiento de Grano en
Germoplasma de Maíz Mejorado con Capacidad para Sintetizar Antocianinas

Por:

SANDRA PATRICIA PÉREZ GODÍNEZ

TESIS

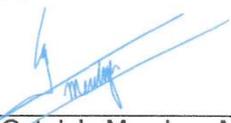
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobado por el Comité de Asesoría:



Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez
Asesor Principal Interno



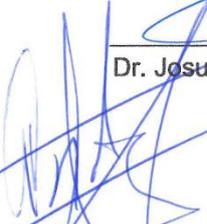
Dra. Carmen Gabriela Mendoza Mendoza
Asesor Principal Externo



Ing. Raúl Gándara Huitrón
Coasesor



Dr. Josué Israel García López
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2022



Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Sandra Patricia Pérez Godínez

AGRADECIMIENTO

Muy orgullosa de poder hacer mención de todas aquellas personas que participaron para ser realidad mis sueños. Les agradezco de poder llegar al cumplimiento de esta meta tan anhelada que es mi título profesional a través de este trabajo de Tesis en honor deseo expresar mi agradecimiento con los siguientes:

*Agradezco a mi ALMA MATER la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por darme la oportunidad de prepararme profesionalmente y por todos los momentos vividos durante toda la carrera.*

*A mis padres **Ovilio Pérez de León y Virginia Godínez Morales**, su sacrificio y confianza que en mí depositaron no fueron en vano porque gracias a su apoyo pude lograr una meta más en la vida.*

*A mis hermanos: **Irení, Andrea, Jose, Roxana, Valeria Y Yuri** por su cariño, apoyo incondicional, y palabras de aliento para poder ser una persona de provecho, gracias por siempre sacarme una sonrisa.*

*A mis tíos: **Gary, Yesí, Limber y Vero** que siempre estuvieron ahí cuando más lo necesite, gracias por sus sabios consejos y su apoyo durante toda la carrera.*

*Agradezco a mi Asesor de Tesis al **Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez** por su dedicación y paciencia para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.*

*A la **Dra. Carmen Gabriela Mendoza Mendoza** y a la **Dra. Ma. del Carmen Mendoza Castillo** por darme la oportunidad en el Colegio de Postgraduados de poder realizar mi trabajo de tesis con su apoyo, paciencia y el tiempo invertido para poder lograr la tesis.*

*A mi mejor amigo **Daní** gracias por tu apoyo incondicional, guía y ayuda durante toda la carrera, gracias por tu amistad.*

DEDICATORIA

A Dios por guiarme por el buen camino, por todas sus bendiciones y darme sabiduría y fuerza de realización personal.

A mis padres Ovilio Pérez de León y Virginia Godínez Morales por los valores y principios que me han inculcando siempre, por su apoyo y sus sabios consejos pude convertirme en una persona de provecho.

A mis abuelos Rubén Pérez y Valeria de León por todo su cariño y apoyo incondicional, sus consejos durante tan valiosos que siempre me daban para poder superarme en la vida, los quiero.

RESUMEN

El maíz morado mexicano es una variante pigmentada de este importante cereal que se ha comenzado a estudiar recientemente en México; por esta razón existen pocos estudios e información acerca de sus características agronómicas. Este maíz ha despertado el interés científico por sus componentes bioquímicos asociados a su coloración, la cual está definida por pigmentos denominados antocianinas; las cuales tienen un gran potencial como antioxidante, insumo textil y/o farmacéutico. El objetivo de este estudio fue evaluar las características agronómicas y de rendimiento de genotipos de maíz pigmentado por antocianinas para su posible uso para la producción de grano y obtención del pigmento flavonoide. Los experimentos se establecieron en dos localidades: en el Campo Agrícola Experimental del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados y en el Campo Agrícola Experimental San Juan, de la Universidad Autónoma Chapingo. La evaluación se realizó bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se utilizó una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹. Las variables evaluadas fueron: rendimiento de grano (t ha⁻¹), floración masculina y femenina, asincronía floral, altura de planta, altura de mazorca, peso de 100 semillas, longitud y diámetro de mazorca, peso de mazorca e índice de desgrane. Los resultados mostraron que la interacción Localidades*Genotipos no fue significativa en cada una de las características evaluadas ($P \leq 0.05$); a pesar de encontrar diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre localidades, y significancia ($P \leq 0.05$) entre los genotipos. El resultado de la interacción permite que a través de un valor promedio de las dos localidades bajo estudio sea posible identificar genotipos que a pesar de las diferencias entre localidades hayan presentado un buen comportamiento en cada una de estas, permitiendo seleccionar a los genotipos con mayor potencial y continuar su mejora dentro del Programa de Mejoramiento Genético de Maíces Pigmentados. Las cruzas que tuvieron una expresión sobresaliente fueron: P1xP7, P8xP1 y P1xP9.

Palabras clave: Genotipo* Ambiente, Mejoramiento, rendimiento, antocianinas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.1.1 Objetivo particular	2
1.2 Hipótesis	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Origen, domesticación y diversificación del maíz	3
2.2 Situación actual del maíz en México	5
2.3 El maíz morado	6
2.4 Mejoramiento genético por selección	11
2.5 Selección masal	14
2.6 Selección masal estratificada	14
2.7 Mejoramiento genético por hibridación	15
III. MATERIALES Y METODOS	18
3.1 Material genético	18
3.2 Ubicación del sitio experimental	20
3.3 Diseño y manejo experimental	20
3.4 Comportamiento agronómico y rendimiento de grano	21
3.4.1 Variables Fenológicas	21
3.4.2 Variables agronómicas	21
3.4.3 Rendimiento de grano	22
3.4.4 Componentes del rendimiento	22
3.5 Análisis estadístico	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1 Análisis de varianza	24
4.2 Comportamiento agronómico en las localidades de evaluación	27
4.3 Expresión agronómica de las cruzas y poblaciones mejoradas	28
4.4 Identificación de genotipos sobresalientes	33
V. CONCLUSIONES	36
VI. BIBLIOGRAFÍA	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los progenitores de las cruzas y de las poblaciones mejoradas evaluadas en localidades de Valles Altos, México.	19
Cuadro 2. Características agroambientales de los sitios de evaluación de genotipos de maíz con capacidad de producir pigmentos antocianos.	20
Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para genotipos de maíz pigmentado por antocianinas establecidos en localidades de los Valles Altos de México.....	26
Cuadro 4. Valores medios de las características agronómicas en cada localidad de evaluación.....	28
Cuadro 5. Número de características deseables en maíces pigmentados por antocianinas establecidos en dos localidades de los Valles Altos de México. .	34
Cuadro 6. Valores medios de la expresión de las características agronómicas de los genotipos a través de las localidades.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Expresión del rendimiento de grano de las cruzas y poblaciones mejoradas en cada localidad de evaluación.	29
---	----

I. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel nacional puesto que ocupa uno de los primeros lugares entre las especies alimenticias destinadas al consumo humano. Se siembra en grandes superficies, tiene un elevado valor de la producción, ocupa a 20 % de la población económicamente activa, su consumo es directo o en diferentes formas y se ha documentado que en México su consumo *per cápita* aparente es de 209.8 a 335.8 kilogramos proporcionando: 39 % de la proteína y 45.2 a 59 % de la energía que consume el mexicano (Morris y López, 2000; Fernández *et al.*, 2013).

En el país se cuenta con una amplia diversidad genética de este cereal, el cual posee gran variación en sus características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas, las cuales, aunadas a su capacidad de adaptabilidad, han permitido la selección de poblaciones a través del tiempo. El objetivo principal de los programas de fitomejoramiento de maíz ha sido incrementar el rendimiento de grano; no obstante, en lustros recientes se ha dado atención al desarrollo de variedades mejoradas que incorporen tanto la composición como la concentración de compuestos fenólicos, carotenoides, glucosinolatos y fitoestrógenos, relevantes para la preservación de la salud humana (Della, 1999; Espinosa *et al.*, 2010).

En cuanto al establecimiento en campo, las variedades mejoradas han presentado rendimientos superiores a los de las poblaciones nativas; sin embargo, los pequeños productores prefieren utilizar sus propias variedades locales, ya que han identificado ciertas ventajas en las nativas, que en su mayoría se siembran en los terrenos más limitados por el tipo de clima (Turrent *et al.*, 2012) y condiciones edáficas. Entre las características sobresalientes de estos maíces se encuentra que pueden tener una mayor adaptación a las

condiciones climáticas locales, estabilidad a la variabilidad climática, costos más bajos de los insumos necesarios para su producción, resistencia a plagas y enfermedades (Villalobos *et al.*, 2019) y de suma importancia, poseen una gran aptitud para la elaboración de productos tradicionales (Guillén *et al.*, 2002).

Algunos resultados del mejoramiento genético en maíz para calidad de grano, muestran que es posible cambiar la cantidad y calidad del aceite de sus granos, que comúnmente fluctúa entre 4 y 5 %, llegando a ser superior a 20 % en líneas especiales mejoradas por selección (Camarena *et al.*, 2014). Asimismo, la cantidad de proteína se ha incrementado, aunque no tanto como el aceite, y se ha identificado la metodología adecuada para duplicar la calidad nutritiva de ésta. Estos ejemplos muestran la maleabilidad del maíz y el potencial que puede tener para México, en particular cuando se considera la enorme diversidad genética presente en el país y la amplia capacidad adaptativa del cultivo a una gran cantidad de ambientes (Perales y Hugo, 2009).

El maíz morado, una variante pigmentada, acumula polifenoles y dentro de este grupo de fitoquímicos son las antocianinas el tipo de flavonoide más importante (Guillen *et al.*, 2014). La mazorca (olote y grano) está constituida en 85 % por grano y 15 % de olote. Su alto contenido en antocianinas, principalmente de cianidina-3-glucosido (C3G), hace que actúe como un poderoso antioxidante natural, anticancerígeno, y antiinflamatorio. Adicionalmente, se ha documentado que las antocianinas del maíz ayudan a disminuir la presión sanguínea y la hipercolesterolemia, mejoran la circulación sanguínea y promueven la regeneración de tejido, entre otros importantes beneficios (Rabanal *et al.*, 2021).

Las antocianinas son compuestos fenólicos responsables de los colores en la tonalidad rosa, azul y morado, que primordialmente se presentan en flores y frutos. No obstante, las antocianinas se pueden obtener del grano de algunas variedades de maíz, en las que se encuentran en cantidades elevadas por lo que

pueden ser fuente de pigmentos naturales para sustituir a algunos colorantes sintéticos usados en los alimentos (Aguilar *et al.*, 2019).

Existen pocos estudios acerca de la variabilidad de las antocianinas y su actividad antioxidante entre recolectas de una misma raza y color de grano. La información es importante para elegir los mejores maíces de grano azul/morado y aprovechar su valor nutracéutico en la elaboración de productos alimenticios o su aprovechamiento industrial no alimenticio (Salinas *et al.*, 2012).

1.1 Objetivo general

Estudiar el desempeño agronómico y el rendimiento de grano de 14 genotipos de maíz (cruzamientos y poblaciones mejoradas) con diferente capacidad de pigmentación por antocianinas en diferentes estructuras morfológicas de la planta y de la mazorca.

1.1.1 Objetivo particular

- Caracterizar agronómicamente la expresión de las cruzas realizadas a partir de progenitores pigmentados en diferentes estructuras de la planta.
- Identificar y seleccionar genotipos con rendimiento de grano sobresaliente para mejorar la producción de maíz pigmentado por antocianinas.

1.2 Hipótesis

La diversidad genética de las poblaciones empleadas como progenitores, permitirá la expresión sobresaliente de cruzas con características agronómicas que mejoren la producción de maíz morado, las cuales se seleccionarán para continuar con el proceso de mejoramiento y de producción de grano.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen, domesticación y diversificación del maíz

Sobre el origen del maíz, en la actualidad, la teoría más aceptada es que el teocintle anual mexicano es el ancestro del maíz. El proceso de evolución fue llevado a cabo mediante la domesticación bajo la intervención del hombre (Kato *et al.*, 2009).

Según Sánchez *et al.* (2000) en México existen al menos 59 razas de maíz, las cuales se clasifican con base en sus características morfológicas y polimorfismos isoenzimáticos. De estas razas, existen siete homólogas en Guatemala, seis en Colombia, cinco en Perú y dos en Brasil, lo que define a México como centro de origen y distribución, donde alrededor de 27 o más de la mitad de ellas han permanecido como variedades locales endémicas (Acosta, 2009).

La domesticación y diversificación del maíz se ha abordado mediante dos teorías alternativas: a) la del origen multicéntrico, es decir, que existieron varios centros de domesticación a partir de diferentes poblaciones de teocintle hace aproximadamente 8000 años y, b) el evento único de domesticación (unicéntrica) que propone que las poblaciones de teocintle de la raza Balsas o subespecie (*ssp.*) *parviglumis* localizadas en el centro de la cuenca del Balsas (oriente de Michoacán, suroeste del estado de México y norte de Guerrero) dieron origen al maíz (Kato *et al.*, 2009).

La teoría multicéntrica establece que el maíz fue originado en varias regiones entre México y Guatemala (Mesoamérica) y se domesticó a través de cinco centros de domesticación; estos se localizaron en el centro y sur del país, donde la diversidad de la especie es amplia, con base en patrones de distribución muy particulares de algunos nudos cromosómicos localizados en varios cromosomas específicos. Kato *et al.* (2009) señalan que los cinco centros de domesticación del maíz fueron:

- 1) Mesa Central de México, que dio origen al maíz primigenio que se le ha dado el nombre de Complejo Mesa Central.
- 2) Región de altura media en los estados de Morelos, México, Guerrero y sus alrededores, que desarrolló el Complejo Pepitilla.
- 3) La región centro-norte de Oaxaca que originó el Complejo Tuxpeño.
- 4) El territorio comprendido entre los estados de Oaxaca y Chiapas, del cual resultó el germoplasma denominado Complejo Zapalote.
- 5) La región alta de Guatemala, del cual surgió el germoplasma denominado Complejo Altos de Guatemala.

Desde el mismo origen del maíz, el hombre ha mantenido activo el proceso de diversificación, mediante el cual ha seleccionado y modificado características genotípicas de la planta, que le han permitido la formación de nuevas poblaciones adaptadas a diversos climas y tipos de suelo donde la interacción ambiente-genotipo y el aislamiento geográfico favorecieron la distribución geográfica de nuevas variantes de maíz (Kato *et al.*, 2009).

La diversificación de las razas de maíz en épocas prehispánicas se llevó a cabo en dos direcciones. La primera, se inició en las tierras altas de México y siguió un desplazamiento hacia el oeste y norte del país, hacia el suroeste de los Estados Unidos de América y continuó hacia el este de Canadá. Una segunda vía fue desde las tierras altas de México hacia el oeste y suroeste de las tierras bajas de México, entrando hacia Guatemala, las islas del Caribe, las tierras bajas de Sudamérica y las montañas de los Andes (Kato *et al.*, 2009).

2.2 Situación actual del maíz en México

El maíz es el cultivo agrícola más importante de México dada la superficie, producción y valor económico generado (SIAP, 2020); es una de las principales fuentes de alimento, principalmente en forma de tortillas y se estima un consumo promedio anual *per cápita* de 335.8 kg; provee 38.8 % de las proteínas y 45.2 % de las calorías diarias necesarias, especialmente en la población rural (Fernández *et al.*, 2013).

En el año agrícola 2020, la producción nacional de maíz fue de 27,707,775 toneladas, lo que significó un aumento de 1.8 % en comparación con las 27,228,242 toneladas del año previo. Para el mercado mexicano, la demanda de maíz blanco se encuentra cubierta con la producción obtenida; sin embargo, en el caso del maíz amarillo, la SADER (2020) indicó que la producción de este grano es insuficiente para satisfacer la demanda nacional, aunque se estimó que habría un alza de 11.7 % para el ciclo agrícola 2021, con una producción esperada de 3,352,155 toneladas.

En México durante 2016 se sembraron 7.7 millones de hectáreas de maíz, de las cuales 91.5 % correspondió a maíz de grano blanco, 8 % a maíz amarillo y el resto (0.5 %) a otro color, en el que se incluyen los maíces de usos especiales. Si bien los maíces pigmentados se distribuyen en todo el territorio nacional, la producción comúnmente se destina al autoconsumo y por lo tanto no se comercializa ni se cuantifica en los mercados (SIAP, 2016).

La mayoría de la producción de maíz en México es de grano de color blanco, también se tienen maíces pigmentados (por antocianinas y carotenoides) que han comenzado a ser revalorados durante las últimas décadas. La siembra de granos pigmentados (0.5 %) ascendió aproximadamente a 40,000 ha en 2016,

principalmente en los estados de Campeche, estado de México, Chiapas, Jalisco, Chihuahua, Guerrero, Puebla y Michoacán (Díaz *et al.*, 2017).

En 2017, 54.5 % del maíz blanco se produjo en cuatro estados: Sinaloa, Jalisco, México y Michoacán; 80 % del maíz amarillo se generó en Chihuahua, Jalisco y Tamaulipas, y 59 % de la producción de maíces de otros colores se concentró en México y Chiapas (SIAP, 2018). El maíz cultivado de otros colores distintos al blanco y amarillo tiene importancia económica, alimenticia, cultural y turística en algunos estados tanto por la superficie sembrada como por su producción.

En 2017, México ocupó el 8° lugar en producción mundial de maíz y exportó a 17 países. En términos de valor las principales exportaciones fueron a Venezuela (58 %), Kenia (33 %), Estados Unidos de América (4 %), entre otros (6 %), ubicándose como el 10° exportador mundial de grano de maíz.

A pesar de que México tiene una gran diversidad genética, poca es la atención que se ha dado al potencial de aprovechamiento que tienen los maíces nativos, los cuales se establecen en alrededor de 65 % de la superficie cultivada, donde los maíces nativos se seleccionan y se domesticación de acuerdo a las necesidades del productor, en donde, Oaxaca es el estado en el cual se han identificado 35 de las 60 razas descritas en México (Guadarrama *et al.*, 2014).

2.3 El maíz morado

El maíz morado es una variante coloreada originaria de América que posee pigmentos naturales (antocianinas) que le confieren características especiales. Dentro de este tipo de maíz, los de origen peruano son los más conocidos a nivel internacional, ya que se reconoce que poseen y son utilizados para la extracción

comercial de antocianinas del grano y olote, para su uso en alimentos. En Perú, actualmente existen variedades mejoradas para su aprovechamiento comercial (Aguilar *et al.*, 2019).

En México, también existen maíces morados nativos, que pueden ser utilizados para la extracción de antocianinas. Se ha reportado que el maíz morado puede contener entre 1.5 % y 6.0 % de pigmento del peso total. Mendoza (2012) describió que las antocianinas pueden ser sintetizadas en diferentes estructuras de la planta como en el tallo, vainas foliares, hojas e inflorescencias y en la mazorca, en donde pigmentan al grano, pero también se pueden encontrar en las brácteas y el olote.

Las antocianinas (del griego *Anthos*: flor y *kyanos*: azul) son compuestos derivados del metabolismo secundario de las plantas que pertenecen al grupo fitoquímico de los fenoles y dentro de ellos se incluyen a los flavonoides, los cuales son responsables de pigmentar de forma natural a los tejidos que los producen; en este grupo de metabolitos secundarios, que se diferencian entre sí por el grado de oxidación que presentan en el tercer anillo que los conforma, se encuentran las flavonas, los flavonoles, las flavonas, las isoflavonas y las antocianinas (Mendoza, 2012).

Las antocianinas son pigmentos naturales encargados de dar pigmentación rojiza, azulada o violeta en la mayoría de las frutas y flores. Es el pigmento más importante, después de la clorofila, el cual es visible al ojo humano; forma parte del grupo de los flavonoides, y este a su vez es un compuesto polifenólico que es un conjunto de varios fenoles los cuales actúan como poderosos antioxidantes al reducir el estrés oxidativo. El estrés oxidativo es el desequilibrio entre especies oxidantes y antioxidantes el cual está asociado a numerosas enfermedades y al proceso normal de envejecimiento (Pérez, 2014).

El color de las antocianinas depende de varios factores intrínsecos, como son los sustituyentes químicos que contenga y la posición de los mismos en el grupo flavilio; por ejemplo, si se aumentan los hidroxilos del anillo fenólico se intensifica el color azul, mientras que la introducción de metoxilos provoca la formación del color rojo (Aguilera *et al.*, 2011).

Según Turturica *et al.* (2015) los diferentes estudios realizados han llegado a la conclusión de que la estabilidad de las antocianinas depende de los factores como: estructura del pigmento, pH, luz, temperatura, enzimas y otras moléculas como el oxígeno y el ácido ascórbico, concentración y actividad de agua.

Las antocianinas pertenecen al grupo de los flavonoides y son glucósidos de las antocianidinas; es decir, están constituidas por una molécula de antocianidina, que es la aglicona, a la que está unida un azúcar a través de un enlace β -glucosídico. La estructura básica contiene un núcleo de flavona que consta de dos anillos aromáticos: un benzopirilio (A) y un grupo fenólico (B), ambos unidos por una unidad de tres carbonos (Rabanal, 2021).

El nivel de hidroxilación y metilación que ocurre en el anillo B de la molécula, determina el tipo de antocianidina, que es la aglicona de la antocianina. Aunque se han descrito doce diferentes antocianidinas, las más comunes en frutos vegetales son: pelargonidina, cianidina, delphinidina y en flores peonidina, petunidina y malvidina (Aguilera *et al.*, 2011).

En el grano, se encontró que los colores atractivos contienen una amplia gama de contenido de antocianinas totales (CAT), los cuales van desde $51 \mu\text{g g}^{-1}$ hasta $1277 \mu\text{g g}^{-1}$. En el estudio de Mendoza *et al.* (2017) se confirma que los maíces morados poseen mayor capacidad de síntesis y almacenamiento de antocianinas que los maíces azules que sólo producen el pigmento en la capa de aleurona. En cuanto al tipo de antocianinas presentes en el grano de maíz pigmentado por este colorante natural, Abdel *et al.* (2006) señalaron que las más

abundantes son: cianidina 3-glucósido en maíces azules, morados y rojos, pelargonidina 3-glucósido en maíces rosados.

El color del grano en los maíces azules, rojo claro y rojo magenta se debe a que las antocianinas se localizan en las capas periféricas, ya sea en la capa de aleurona o en el pericarpio. El tono de color depende del tipo de antocianinas que dominen en el grano. En los maíces azules y morados prevalecen los derivados de cianidina, en los rojos predominan los de pelargonidina, y en el rojo magenta los de cianidina, pero también contiene derivados de pelargonidina y peonidina (Salinas *et al.*, 2012).

En el grano, se ha reportado la presencia de antocianinas en el pericarpio, en la capa de aleurona, o en ambas estructuras (Salinas *et al.*, 2005). Debido a su alto contenido de antocianinas (cianidina-3-glucósido C3G que es su principal colorante) y compuestos fenólicos actúa como un poderoso antioxidante natural y anticancerígeno, teniendo además propiedades funcionales debido a estos compuestos bioactivos (Guillén *et al.*, 2014).

El pericarpio del maíz morado contiene aproximadamente 10 veces más antocianinas que otras plantas, siendo más frecuentes encontrarlas en flores y frutos, estas estructuras son las que contribuyen a los brillantes colores rojos, azules y morados de estos tejidos vegetales. Esto quiere decir que puede satisfacer las necesidades de la producción industrial de antocianina, debido a que el maíz morado contiene 10 % de antocianinas (Salinas *et al.*, 2013).

Los componentes químicos esenciales presentes en el maíz morado son ácido salicílico, grasas, resinas, saponinas, sales de potasio y sodio, azufre y fósforo, pero ante todo compuestos fenólicos (Arroyo *et al.*, 2007).

En la industria alimentaria, farmacéutica y textil se ha encontrado una fuente importante para el aprovechamiento de estos recursos debido a su alto potencial como colorantes naturales, son fuente de pigmentos que puede sustituir a los colorantes artificiales, como alimentos funcionales y como productos nutraceuticos, eliminando el uso de colorantes artificiales ya que estos producen daños a la salud (Mendoza, 2012).

Los maíces nativos actuales poseen una gran diversidad genética y potencial para producir alimentos funcionales que ayuden a la población más vulnerable a enfrentar los graves problemas de desnutrición y salud. Contienen compuestos fenólicos de alto valor, de modo que constituyen un reservorio y patrimonio genético por explorar, un papel fundamental que incluye la presencia de compuestos nutraceuticos para prevenir e inclusive tratar a las enfermedades crónico-degenerativas, estos compuestos se clasifican de acuerdo con sus propiedades químicas y su actividad biológica. Durante la nixtamalización, el almidón del maíz se pregelatiniza, la proteína se desnaturaliza y el pericarpio o salvado se hidroliza parcialmente. Nutritionalmente, el maíz cocido o nixtamal contiene una alta cantidad de calcio disponible y mejor disponibilidad de niacina (Serna *et al.*, 2013).

Por las características especiales se ha concluido que los maíces morados mexicanos en su estado nativo poseen un gran potencial de aprovechamiento, constituyen un destacado reservorio y patrimonio genético; sin embargo, tienen bajo rendimiento de grano, alta susceptibilidad a enfermedades, ciclo biológico largo, así como la complejidad del carácter de color de grano, por lo que resulta imprescindible la implementación de metodologías de mejoramiento genético para transformarlos en una fuente más redituable y eficiente para la extracción del colorante natural (Mendoza *et al.*, 2017).

Los investigadores tienen un papel importante en el estudio e investigación de las antocianinas y derivados para conocer la gran diversidad de funciones, las

cuales van desde las más básicas como lo es su capacidad de actuar como atrayente de polinizadores, hasta funciones específicas en el metabolismo de las plantas; inclusive, en los últimos años se han evolucionado investigaciones enfocadas al estudio de sus propiedades bioactivas. Además, van dirigidas a encontrar y fomentar el consumo de productos amigables y menos procesados debido a los casos de humanos con enfermedades cardiovasculares, diabetes y cáncer, son factores de oportunidad para el uso de estos flavonoides (Mendoza, 2012).

La presencia del cambio climático en las áreas agrícolas, impone la necesidad de generar medidas de adaptación a las nuevas condiciones agroclimáticas que trae consigo este fenómeno especialmente en cultivos como el maíz, que es el cereal más sembrado en el mundo. La formación de nuevas variedades de cultivo constituye una de las medidas de adaptación más adecuadas; ya que a través de la selección se solucionan varios problemas que el cambio climático impone, sobre el sistema de producción tales como: estrés hídrico y térmico, baja viabilidad del polen, aceleración de la fenología de la planta, baja productividad e incremento en la ocurrencia de plagas, enfermedades y malezas (Ruiz *et al.*, 2011).

2.4 Mejoramiento genético por selección

Las metodologías para realizar selección son muy diversas, y casi se puede generalizar que cada mejorador tiene una metodología de selección; sin embargo, parte de esa metodología es común, y debe de seguir rigurosamente los postulados de la ciencia de la genética en los que se basa la selección.

Todos los métodos tienen como objetivo seleccionar los mejores genotipos dentro de una población, o crear genotipos nuevos con características previamente definidas en las variedades nativas. Todos los métodos están diseñados, para en mayor o menor grado: 1. Generar semilla cuya descendencia

reproduzca el genotipo deseado, 2. Hacer máximo uso de la variabilidad genética presente en las poblaciones seleccionadas, 3. Crear mayor variabilidad genética, a través de la recombinación, para obtener nuevos genotipos, 4. Evaluar la descendencia para definir el genotipo, 5. Ejercer control del mecanismo de floración y polinización, 6. Controlar el efecto del ambiente, de la interacción genotipo por ambiente y del error experimental, para mejorar la heredabilidad (Camarena *et al.*, 2014).

El mejoramiento de poblaciones permite generar nuevas variedades mejoradas de polinización libre; las plantas de estas poblaciones con alelos favorables al recombinarse producen genotipos superiores. El incremento de los caracteres de importancia económica que se logre en cada ciclo de selección estará en función de la variabilidad genética de la población bajo mejoramiento. La variabilidad se puede analizar para estimar los parámetros genéticos de la población. La estimación de dichos parámetros es importante cuando la población se ha sometido a un proceso continuo de selección y se desea saber que tan efectiva ha sido ésta en producir cambios favorables en ella (Coyac-Rodríguez *et al.*, 2013).

El efecto de la selección incide directamente en las frecuencias génicas de la población, por lo que las varianzas genéticas sufren cambios que dependen del tipo de acción génica predominante. Como resultado, esas varianzas se aproximan a cero cuando las frecuencias de los genes favorables para la expresión de un carácter se aproximan a la unidad (Coyac-Rodríguez *et al.*, 2013).

El propósito de la selección recurrente en un programa de fitomejoramiento es mejorar el rendimiento de una población con respecto a uno o más rasgos de interés agronómico, de modo que la nueva población sea superior a la población original en rendimiento medio y en desempeño de mejores individuos dentro de la población (Acquaah, 2014).

El material de origen para selección puede ser una población de apareamiento aleatorio, poblaciones, variedades sintéticas, cruza simple o cruza doble. La población mejorada puede ser liberada como nuevo cultivo utilizando como material de mejoramiento en otros programas de mejoramiento. El resultado más deseable de la selección recurrente es que la población mejorada sea producida sin reducción de la variabilidad genética, de esta manera la población puede responder al mejoramiento en ciclos posteriores (Acquaah, 2014).

El éxito de un programa de selección recurrente se basa en la naturaleza genética de la población base, varios factores deben ser considerados en el desarrollo de la población básica, en primer lugar los progenitores deben tener un alto rendimiento con respecto a los rangos de interés y no deben estar estrechamente relacionados, esto aumentaría la posibilidad de maximizar la diversidad genética en la población, también se recomienda incluir tantos progenitores como sea posible en el cruce inicial para aumentar la diversidad genética, el cruzamiento proporciona la oportunidad de recombinación de genes para aumentar la diversidad genética de la población, más ciclos aumentarán la oportunidad de recombinación, pero aumenta el ciclo de producción del programa (Acquaah, 2014).

La selección recurrente consiste básicamente en recombinar los genotipos seleccionados para formar una población de la que se seleccionan nuevamente los genotipos superiores; es el método general que se usa en el mejoramiento de plantas alógamas. Sin embargo, últimamente se está utilizando también en plantas autógamas, y en plantas de reproducción vegetativa (Camarena *et al.*, 2014).

2.5 Selección masal

Este método consiste en la selección de un gran número de individuos, con características fenotípicas similares que luego son mezclados para constituir la generación siguiente. Es uno de los más métodos más antiguos y simple que se conoce de mejoramiento. Este método es eficiente en poblaciones heterogéneas, constituidas por mezclas de líneas puras, en especies autógamas o por individuos heterocigotos en el caso de alógamas, es poco utilizado para las características de baja heredabilidad. La idea principal de la selección masal es que, al escoger los mejores fenotipos, se mejora el nivel de la población con la reunión de los fenotipos superiores ya existentes. Esto es, con solamente identificar el fenotipo de los individuos que son considerados superiores para la selección. Algunos casos donde se ha utilizado la selección masal son: 1) A partir de variedades locales, 2) Para purificación de variedades y 3) Después de la hibridación (Camarena *et al.*, 2014).

Según Allard (1978), la selección masal es el aumento de la proporción de genotipos superiores en la población. La selección masal ha sido efectiva para aumentar las frecuencias genéticas en caracteres que se pueden ver o medir fácilmente; ha sido útil para la obtención de variedades para fines especiales y para cambiar la adaptación de variedades mejoradas en nuevas zonas de producción. La selección masal puede modificar el arquetipo de la planta, el ciclo de maduración, características del grano y otros caracteres que se pueden reconocer fácilmente. Además, se sabe que la hibridación entre variedades tuvo su importancia para conseguir la variabilidad a partir del cual se seleccionaron nuevas variedades (Acquaah, 2014).

2.6 Selección masal estratificada

La selección masal estratificada es un método que se emplea para evitar el efecto ambiental sobre la selección de plantas dentro del lote de selección masal

en competencia completa y ha mostrado mejores resultados en el mejoramiento. Esto tiene mayor importancia cuando el objetivo es disminuir la altura de la planta y de mazorca o aumentar rendimiento. Dentro de los efectos ambientales que más importancia tienen en la selección son la fertilidad del suelo y la falta de competencia entre plantas (MenC,2011).

Esta selección consiste en diseñar una parcela, la cual se divide en subparcelas para que dentro de cada subdivisión se tomen con un amplio criterio las mejores plantas para lograr en las generaciones futuras rendimientos superiores (Cortez, 2014).

Algunos métodos comunes de mejora intrapoblacional, incluyen la selección masal, la selección de mazorca por hilera y la selección recurrente. Los métodos intrapoblacionales se pueden basar en plantas individuales como la unidad de selección, o la selección de la familia. Las unidades de selección son plantas individuales (Ramírez *et al.*, 2000).

2.7 Mejoramiento genético por hibridación

Un híbrido de maíz resulta cuando una planta de maíz fecunda a otra que genéticamente no está emparentada con la primera. Es una cruce entre dos progenitores: una hembra y un macho. Como los órganos masculino y femenino del maíz están separados, resulta relativamente fácil hacer una cruce entre dos plantas, a fin de producir semilla híbrida. Esta semilla posee una configuración genética única, resultado de ambos progenitores, y produce una planta con ciertas características, como una madurez específica, resistencia a enfermedades, cierto color de grano, pueden incrementar el rendimiento. En el caso del maíz, existen varios tipos de híbridos, como el híbrido simple, híbrido triple e híbrido doble (MacRobert *et al.*, 2015).

Los componentes básicos de los híbridos de maíz son las líneas endogámicas. Éstas son el resultado de la autopolinización repetida de ciertas poblaciones de maíz con el fin de producir plantas que tienen una configuración genética fija y uniforme. En consecuencia, todas las plantas de una línea endogámica específica son idénticas, pero la configuración genética de cada línea endogámica es diferente de la de las otras líneas endogámicas. Estas líneas son pequeñas y de bajo vigor; sin embargo, cuando dos líneas son cruzadas producen un híbrido de vigor renovado y con rendimiento significativamente mayor (MacRobert *et al.*, 2015).

La heterosis o vigor híbrido es la base del mejoramiento genético por hibridación. La heterosis se define como un fenómeno en el cual el híbrido resultante del cruzamiento entre dos variedades es superior en crecimiento, tamaño, rendimiento y en vigor a éstas. La obtención de híbridos de alto rendimiento depende de la heterosis que se genera en el cruzamiento de los progenitores (Esquivel *et al.*, 2011).

La aptitud combinatoria general (ACG) es el comportamiento promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, y la aptitud combinatoria específica (ACE) se define en casos en los cuales ciertas combinaciones híbridas específicas se expresan favorablemente o no con respecto al comportamiento promedio de sus progenitores. Las líneas con efectos altos de ACG se pueden emplear para desarrollar variedades sintéticas, mientras que combinaciones específicas de alto rendimiento se pueden usar en la hibridación (Cervantes *et al.*, 2018).

Los programas de mejoramiento genético dedicados a la formación de híbridos y variedades requieren generar líneas con alto potencial de rendimiento, buen comportamiento agronómico y buena aptitud combinatoria. Se ha encontrado que las líneas que reúnen estas características presentan resultados satisfactorios en combinaciones híbridas. Siendo una de las alternativas el uso de híbridos, los cuales aumentan la producción y la productividad y garantizan la

calidad de las cosechas, obteniendo mayores rendimientos al agricultor, haciéndolas más competitivas, comparadas con el uso de variedades de polinización libre y con variedades nativas (Cieza *et al.*, 2020).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Material genético

En el presente trabajo se estudiaron 14 genotipos de maíz que se caracterizan por su capacidad para pigmentar a diferentes estructuras de la planta y a las estructuras de la mazorca (10 cruzas y 4 poblaciones mejoradas). Los materiales se obtuvieron del Programa de Mejoramiento de Maíces Pigmentados del PREGEP-Genética del Colegio de Postgraduados. En el Cuadro 1 se muestran las características de los progenitores de las cruzas (P1 a P9) y de las poblaciones mejoradas (PM1 a PM4).

Cuadro 1. Características de los progenitores de las cruzas y de las poblaciones mejoradas evaluadas en localidades de Valles Altos, México.

Progenitor/Población	Color de grano	Estructura pigmentada	Origen
P1	Azul	Plántula	Oaxaca
P2	Amarillo	Planta morada	Tlaxcala
P3	Trigueño	Brácteas moradas	Tlaxcala
P4	Blanco	Brácteas moradas	Tlaxcala
P5	Morado	Mazorca	Tlaxcala
P6	Morado	Mazorca	Tlaxcala
P7	Morado	Mazorca	Tlaxcala
P8	Morado	Mazorca	Tlaxcala
P9	Morado	Mazorca	Perú
PM1	Morado	Mazorca	Tlaxcala
PM2	Morado	Mazorca	Tlaxcala
PM3	Morado	Mazorca	Tlaxcala
PM4	Morado	Mazorca	Tlaxcala

P: Progenitor; PM: Población mejorada.

Para formar las 10 cruzas que se evaluaron en este estudio, en el ciclo primavera-verano (P-V) 2018 se realizó un sistema de cruzamientos entre los progenitores descritos en el Cuadro 1. En el caso de las poblaciones (Cuadro 1), estas han sido mejoradas a través de selección masal estratificada.

3.2 Ubicación del sitio experimental

En el ciclo agrícola primavera-verano 2019, tanto las cruzas como las poblaciones mejoradas se establecieron en dos ensayos de campo. Las localidades de evaluación se ubicaron en el Campo Agrícola Experimental del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados y en el Campo Agrícola Experimental San Juan, de la Universidad Autónoma Chapingo, cuyas características ambientales se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características agroambientales de los sitios de evaluación de genotipos de maíz con capacidad de producir pigmentos antocianos.

Sitio de evaluación	Altura msnm	Temperatura °C	Precipitación mm
Campo Agrícola Experimental San Juan, Universidad Autónoma Chapingo	2300	15.6	635.5
Campo Agrícola Experimental, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados	2250	15.0	645.0

msnm: metros sobre el nivel del mar; °C: grados Celsius; mm: milímetros

3.3 Diseño y manejo experimental

Los genotipos se establecieron bajo el diseño experimental de Bloques Completos al Azar con tres repeticiones. El tamaño de la parcela experimental consistió en dos surcos de 5 m de largo y 0.8 m entre surcos. Los genotipos se establecieron bajo una densidad de población de 50 000 plantas ha⁻¹.

En ambas localidades se aplicó la dosis de fertilización 120-80-00, que es la recomendada para la región agrícola de Valles Altos; se aplicó la mitad del

nitrógeno y todo el fósforo al momento de la siembra y el resto durante el aporque; el cultivo se mantuvo sin restricciones de humedad durante todo el ciclo, mediante la aplicación del riego cuando la precipitación fue insuficiente.

3.4 Comportamiento agronómico y rendimiento de grano

Para evaluar el desempeño agronómico y potencial de rendimiento de las poblaciones y cruza bajo estudio, las variables se clasificaron en cuatro tipos: fenológicas, agronómicas, rendimiento y componentes del rendimiento.

3.4.1 Variables Fenológicas

Días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF). Se contaron los días transcurridos desde la siembra hasta que 50 + 1 % de las plantas de la parcela iniciaron la liberación de polen y la exposición de estigmas, respectivamente.

Asincronía floral (ASF). Se obtuvo de la diferencia entre DFM y DFF.

3.4.2 Variables agronómicas

Altura de planta (AIPta). Se estimó mediante el promedio de cinco plantas con competencia completa por cada repetición, considerando la longitud desde la base del tallo hasta la lígula de la hoja bandera, la unidad de medición fue en centímetros (cm).

Altura de mazorca (AIMz). En las mismas plantas utilizadas para obtener AIPta, se midió AIMz, la cual se obtuvo a partir del nivel del suelo hasta el nudo de la inserción de la mazorca principal, en cm.

3.4.3 Rendimiento de grano

Rendimiento de grano (Rto). El rendimiento de grano por parcela se calculó mediante la siguiente fórmula: $R_{toUE} = \frac{[(PMz_{UE})(Id_{esg})(100-\%Hum)]}{0.86}$, donde: R_{toUE} = Rendimiento por unidad experimental; Pmz = Peso de mazorca por unidad experimental durante la cosecha; Id = Índice de desgrane; $\%Hum$ = Porcentaje de humedad de la muestra de grano en campo y 0.86 = Factor de corrección para ajustar la humedad del grano a 14 %. Posteriormente, con el tamaño de parcela (8.0 m^2) se estimó el rendimiento de grano en t ha^{-1} .

3.4.4 Componentes del rendimiento

Se utilizaron 5 mazorcas primarias representativas de cada población para registrar:

Longitud de mazorca (Lmz). Se midió desde la base a la punta de la mazorca, en cm.

Diámetro de mazorca (Dmz). Se midió en la parte central de la mazorca, en cm.

Peso de mazorca (Pmz). Se obtuvo al promediar el peso de cinco mazorcas primarias representativas de cada unidad experimental, en g.

Índice de desgrane (Id). Se obtuvo al calcular la relación entre peso de grano (P_{gr}) y peso de la mazorca (P_{mz}). $Id = \frac{P_{gr}}{P_{mz}} \times 100$.

Peso de cien semillas (P100S): De cada mazorca se seleccionaron cien semillas al azar y se registró su peso en g.

3.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se hizo con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0 (SAS, 2009), realizando el análisis de varianza combinado con el diseño de Bloques Completos al Azar, así como la comparación de medias correspondiente con la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de varianza

En el Cuadro 3 se presentan los cuadrados medios del análisis de varianza realizado para identificar la significancia entre los genotipos de maíz evaluados, las localidades de evaluación y la interacción de ambos factores.

El análisis mostró que para la mayoría de las variables estudiadas hubo diferencias altamente significativas entre localidades ($P \leq 0.01$) y solo significativas ($P \leq 0.05$) para asincronía floral (ASF). Asimismo, se observó que, entre los genotipos evaluados, la mayoría de las características mostraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$). En el caso de peso de cien semillas (P100S), longitud de mazorca (Lmz) y diámetro de mazorca (Dmz) hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) y para ASF no hubo significancia estadística.

Los resultados del análisis demostraron diferencias asociadas al componente ambiental; si bien, los sitios de evaluación se ubicaron en localidades de los Valles Altos de México y el manejo agronómico del cultivo fue similar entre éstas, se considera que la distinta expresión agronómica observada entre localidades se pudo deber a que los genotipos se adaptaron de forma diferente a los factores térmicos y edáficos específicos de cada localidad.

La diferencia entre genotipos probablemente fue resultado de su constitución genética (cruzas y poblaciones mejoradas por selección) así como de la diversidad genética presente entre los mismos (distintos colores de grano que

impactan al rendimiento y al peso de la semilla). El encontrar diferencias entre los materiales era algo esperado, pero sobre todo importante para poder identificar a aquéllos con potencial superior y continuar su mejora dentro del Programa de Mejoramiento Genético de Maíces Pigmentados.

A pesar de que hubo diferencias significativas entre localidades y entre los genotipos, se observó que la interacción Localidades*Genotipos no fue significativa para las características evaluadas ($P \leq 0.05$); es decir, que, la expresión de los genotipos a través de las localidades mostró una tendencia similar poco contrastante.

El hecho de que no exista significancia en la interacción, permite que la expresión de los genotipos pueda ser descrita a través de un valor promedio de las dos localidades bajo estudio. También de esta forma es posible identificar genotipos que a pesar de las diferencias entre localidades presenten un buen comportamiento en cada una de ellas.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para genotipos de maíz pigmentado por antocianinas establecidos en localidades de los Valles Altos de México.

FV	GL	Rto t ha ⁻¹	DFM días	ASF días	AIPTa cm	AIMz cm	P100S g	Lmz cm	Dmz cm	Pmz g	Id %
Localidades	1	52.2 **	129 **	2.67 *	35580.35 **	33376.4 **	447 **	11.88 **	3.93 **	18.6 **	260 **
Bloq(Loc)	4	3.37 *	37.1 **	1.34 *	573.15 **	463.79 **	206	2.29	0.08	1.23 *	42 **
Genotipos	13	13.2 **	35.2 **	0.55 NS	889.07 **	373.14 **	555 *	12.03 *	0.15 *	1.04 **	23.5 **
Localidades*Genotipos	13	0.9 NS	4.6 NS	0.47 NS	104.39 NS	44.03 NS	147 NS	0.79 NS	0.05 NS	0.1 NS	5.95 NS
Error	52	1.27	4.14	0.4	111.54	81.97	21.9	1.32	0.07	0.41	7.31
CV (%)		32.5	2.64	20.9	4.76	6.95	16.6	9.46	6.04	20	3.1

^{NS}: Diferencias no significativas; *: Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); **: Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); FV: Fuente de variación; GL: grados de libertad; Rto: Rendimiento de grano; DFM: Días a floración masculina; ASF: Asincronía Floral; AIPTa: Altura de la planta; AIMz: Altura de la mazorca; P100S: Peso de cien semillas; Lmz: Longitud de mazorca; Dmz: Diámetro de mazorca; Pmz: Peso de la mazorca; Id: Índice de desgrane; CV: Coeficiente de variación.

4.2 Comportamiento agronómico en las localidades de evaluación

En el Cuadro 4, se muestran los valores medios de las características agronómicas, rendimiento y componentes del rendimiento que se evaluaron en cada localidad. Se puede observar que en cuanto a rendimiento de grano (Rto) hubo una expresión superior en San Juan (4.2 t ha^{-1}) con respecto a Montecillo (2.6 t ha^{-1}). Aunque pareciera que el rendimiento en ambas localidades fue limitado (ya que se considera que las condiciones de producción fueron adecuadas), una probable razón de la productividad registrada se puede atribuir a la constitución bioquímica del grano, ya que los maíces de color de grano azul y morado tienen endospermo harinoso que tiende a tener un peso inferior al que comúnmente se registra en los maíces de color blanco y amarillo. Asimismo, la incidencia de enfermedades en la mazorca y la alta susceptibilidad de algunos materiales, ocasionaron una merma en la capacidad productiva (Montecillo, datos no mostrados).

Además, se considera que los genotipos evaluados pudieron mostrar desadaptación, ya que este es un comportamiento que ha sido reportado con anterioridad en poblaciones nativas de maíz morado cuando se siembran en condiciones ambientales distintas a las de su lugar de origen (Mendoza, 2017).

Dado que se plantea producir a este tipo de maíces en los Valles Altos de México y con base en los resultados que se registraron (rendimientos limitados), se considera imprescindible que se sigan continuando las evaluaciones en diferentes localidades aunque se trate de una misma región ecológica, ya que existe evidencia de que los maíces de color, como el maíz azul, puede tener una producción diferenciada (desde 3.5 hasta 6.7 t ha^{-1}) debido a la diversidad ambiental presente incluso dentro de una misma región (Arellano *et al.*, 2003).

Cuadro 4. Valores medios de las características agronómicas en cada localidad de evaluación.

Ambiente	Rto t ha ⁻¹	DFM días	ASF días	AlPta cm	AlMz cm	P100S g	Lmz cm	Dmz cm	Pmz g	Id %
Montecillo	2.6 ^b	78.2 ^a	3.2 ^a	242.4 ^a	150.1 ^a	25.7 ^b	11.8 ^b	4.3 ^b	84.9 ^b	85.2 ^b
San Juan	4.2 ^a	75.7 ^b	2.9 ^b	201.3 ^b	110.2 ^b	30.3 ^a	12.5 ^a	4.7 ^a	114.7 ^a	88.7 ^a
DMS	0.5	0.89	0.28	4.62	3.96	2.07	0.51	0.12	8.8	1.2

Letras iguales en la columna no son estadísticamente diferentes. Rto: Rendimiento de grano; DFM: Días a floración masculina; ASF: Asincronía floral; AlPta: Altura de la planta; AlMz: Altura de la mazorca; P100S: Peso de 100 granos; Lmz: Longitud de mazorca; Dmz: Diámetro de mazorca; Pmz: Peso de la mazorca; Id: Índice de desgrane; DMS: Diferencia mínima significativa ($p < 0.05$).

El mayor rendimiento obtenido en San Juan, se asoció a que en esta localidad hubo una expresión sobresaliente de los componentes del rendimiento: mayor P100S (30.3 g), Lmz (12.5 cm), Dmz (4.7 cm), Pmz (114.7 g), Id (88.7 %), a diferencia de Montecillo donde estas características fueron limitadas (25.7 g, 11.8 cm, 4.3 cm, 84.9 g y 85.2 %, respectivamente).

Respecto a las variables fenológicas, se encontró que en Montecillo el ciclo fenológico fue más largo (DFM =78.2 días), hubo más ASF (3.2 días), y tanto AlPta como AlMz fueron superiores. Para la producción de grano se considera que estas características no son deseables en los genotipos mejorados. Es probable que la expresión inferior de los genotipos en esta localidad se deba a un proceso de desadaptación a las condiciones ambientales, mientras que, en San Juan, a pesar de que los genotipos no fueron seleccionados ni formados ahí, encontraron un nicho similar a las condiciones de su lugar de origen (principalmente Tlaxcala).

4.3 Expresión agronómica de las cruzas y poblaciones mejoradas

En la Figura 1, se muestra gráficamente cual fue la expresión del rendimiento de cada genotipo estudiado en cada localidad de evaluación. En esta se puede

observar que hubo diferencias entre el Rto de los genotipos evaluados, lo que permitió identificar y seleccionar a los genotipos superiores. También se observó la existencia de interacción genotipo por localidad, donde algunos genotipos tuvieron una expresión cruzada a través de localidades; no obstante, esta no fue significativa y se consideró que en general todos los materiales mostraron la misma tendencia; es decir, el mismo ordenamiento numérico a partir de la expresión del rendimiento en cada localidad y por lo tanto es posible su caracterización a través del valor medio de ambas localidades.

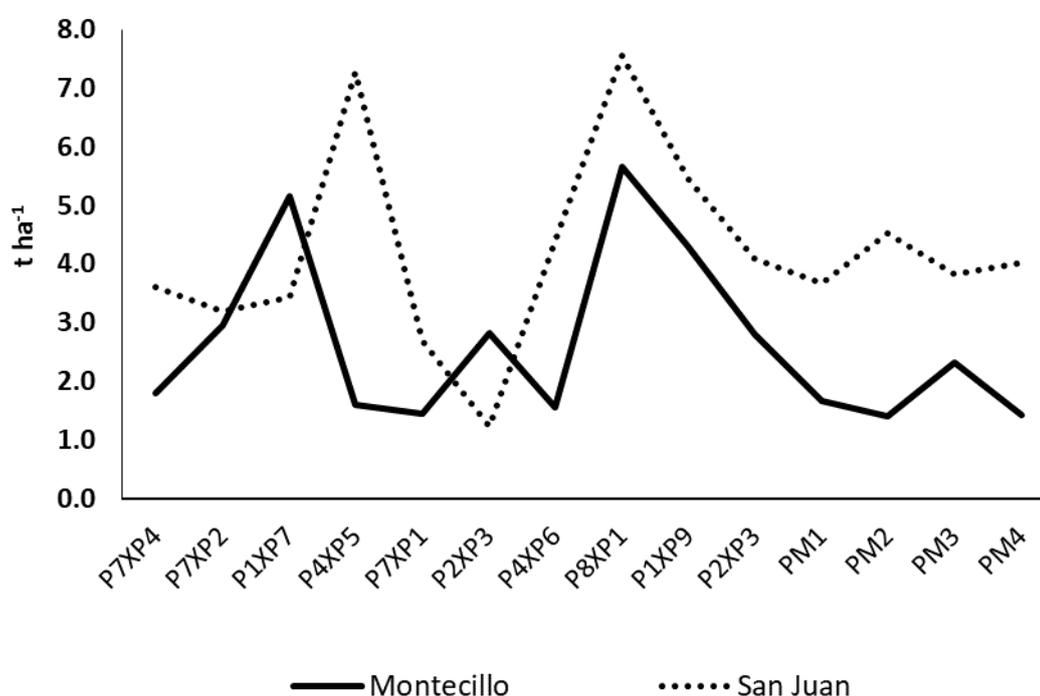


Figura 1. Expresión del rendimiento de grano de las cruas y poblaciones mejoradas en cada localidad de evaluación.

En el Cuadro 6, se muestran los valores medios de los genotipos para las características estudiadas; en este se puede observar la diversidad en el comportamiento agronómico de los genotipos.

El rendimiento de grano fluctuó entre 0.2 y 6.6 t ha⁻¹ con un valor medio de 3.5 t ha⁻¹. Se encontró que en las cruas y las poblaciones mejoradas, P8xP1 (6.6 t

ha⁻¹) y PM3 (3.1 t ha⁻¹) fueron los genotipos que tuvieron los rendimientos superiores dentro de cada grupo de cruzamientos y poblaciones, respectivamente. Sorpresivamente P7xP1, que es la craza recíproca del segundo genotipo más rendidor (6.2 t ha⁻¹), fue la craza de menor rendimiento (1.3 t ha⁻¹), mientras que, entre las poblaciones, PM4 fue la población menos rendidora (0.2 t ha⁻¹). Pese a que el rendimiento de las poblaciones se podría considerar limitado (en especial si se toma como referencia a los rendimientos reportados en maíces blancos, que son los más estudiados), se identificaron cuatro cruzas que superaron al rendimiento promedio: P8xP1, P1xP7, P1xP9 y P2xP3 (3.6 a 6.6 t ha⁻¹).

Tomando en cuenta los rendimientos reportados por Arellano *et al.* (2003) en maíces azules mejorados (maíces sobresalientes: más de 5.6 t ha⁻¹, maíces con escasa adaptación: menos de 3.8 t ha⁻¹), se considera que aún es posible incrementar el potencial de rendimiento en los genotipos con capacidad de producir antocianinas.

Asimismo, a pesar de que se podría considerar que el rendimiento es bajo, se observó que en algunas cruzas y poblaciones mejoradas el fitomejoramiento ha tenido un efecto positivo; hay cruzas con rendimiento superior al reportado por Mendoza (2017) en poblaciones nativas (2.4 a 3.1 t ha⁻¹) (Cuadro 6). También, los resultados de esta investigación ponen en evidencia que además de llevar a cabo prácticas de mejoramiento genético para la pigmentación en la planta y en las estructuras de la mazorca, es posible mejorar el rendimiento de grano.

Los días a floración masculina (DFM) mostraron un intervalo de 74.5 hasta 83.8 días, por lo cual los genotipos se consideraron de ciclo intermedio, aunque al ser comparados con el intervalo que mostró Arellano *et al.* (2003) en maíces azules (90 a 114 días), podrían también ser clasificados como precoces. Las diferencias en la floración de maíces morados y azules, se asociaron a las condiciones bajo las cuales se establecen las poblaciones; los morados, se cultivan bajo

condiciones de secano muy limitadas y con probabilidades de heladas tempranas, en suelos arenosos y sin fertilizantes, mientras que comúnmente los azules son de climas templados con condiciones de secano menos restrictivas y suelos de mayor vocación agrícola.

Respecto a la fenología, Mendoza (2017) encontró que las poblaciones nativas de maíz morado se expresaron con un ciclo tardío (> 90 días) en la localidad de origen y un ciclo de floración intermedio (80 días) en la localidad diferente a su origen ecológico, ciclo que correspondió con los genotipos estudiados que mostraron una floración intermedia (Cuadro 5).

La asincronía floral, que se refiere a los días de diferencia entre la floración masculina y femenina, mostró un intervalo de 2.5 a 3.3 días. Aunque lo ideal es que la ASF sea la menor posible (para garantizar que el proceso de fecundación ocurra con éxito), la ASF de los genotipos es aceptable; no obstante, es recomendable reducir esa diferencia al máximo para influir de manera positiva en el rendimiento de grano.

La altura de la planta y la mazorca mostró intervalos de 198.7 a 241.0 cm, y de 117.5 a 138.7 cm, respectivamente; las dimensiones de la planta (incluyendo la posición de la mazorca que en promedio fue de 0.59, datos no mostrados) se consideraron adecuadas y acorde a las condiciones de producción; no obstante, fueron de alturas superiores a las encontradas por Arellano *et al.* (2003); además se observó que la altura de las poblaciones es menor cuando estas se establecen en la localidad de origen.

En los componentes del rendimiento (P100S Lmz, Dmz, Pmz e Id) hubo variación entre los genotipos estudiados. El P100S fluctuó entre 23.4 a 33.8 g. Con base en este intervalo y utilizando la clasificación de tamaño de grano de Salinas-Moreno *et al.* (2010), la mayoría de los genotipos poseen un tamaño de grano pequeño (< a 33 g, Cuadro 6), con excepción de la cruce P1xP7 que tiene un

tamaño de grano mediano, al tener un P100S mayor a 33 g. Las cruzas P7xP2 y la población mejorada PM2 mostraron un P100S > 30 g. Salinas *et al.* (2012) evaluaron maíces pigmentados originarios de Chiapas y reportaron P100S superiores a los del presente estudio, lo que indicó que hay posibilidades de mejorar esta característica, aunque también esto puede estar asociado con las características de la mazorca de cada grupo racial; inclusive, las diferentes condiciones de producción.

La longitud de la mazorca (Lmz) mostró variación de 10.5 a 15.3 cm, predominando entre los genotipos mazorcas menores a 12 cm, mismas que se consideraron pequeñas, en especial porque los ensayos tuvieron un manejo agronómico adecuado para la producción.

Los resultados mostraron que aquellos genotipos de Lmz superior presentaron rendimientos sobresalientes y por lo tanto se consideró una característica importante durante la selección para la mejora del rendimiento. Mendoza (2017) mostró Lmz similares a las del estudio; sin embargo, en materiales de grano blanco en Valles Altos, Pecina *et al.* (2011) mostró un valor promedio de 15 cm.

La variación en el Dmz fue sumamente restringida, las diferencias no fueron superiores a un cm de diámetro (Dmz = 4.3 a 4.8 cm). Aunque hubo genotipos sobresalientes, se consideró que los genotipos tienen mazorcas de diámetro limitado, aunque es necesario mencionar que comúnmente la profundidad del grano es superior a la encontrada en los híbridos comerciales de grano blanco, donde estos presentan mazorcas de mayor diámetro, pero su índice de desgrane es menor dado el amplio diámetro del olote a diferencia de los nativos.

El Pmz presentó una variación de 81.2 a 132.6 g, entre esta diversidad, se identificó solo una crusa con Pmz > 132.6 g (P1xP7) y otros seis genotipos con Pmz superior al peso promedio (100.4 g): P7xP2, P8xP1, P1xP9, P2xP3, PM2 y

PM4, cuyos progenitores o poblaciones de origen son de grano azul, morado, amarillo o trigueño (Cuadro 1 y Cuadro 6).

En todos los genotipos, se tuvo un índice de desgrane (Id) superior a 80 %, siendo parecidos al Id reportado en maíces nativos. Se consideró que entre los genotipos evaluados fueron superiores aquellos con Id mayor a 87 %: P7xP2, P1xP7, P7xP1, P2xP3 y las cuatro poblaciones mejoradas (Cuadro 6). Mendoza (2017) encontró en poblaciones nativas de maíz morado índices de desgrane de hasta 92 %.

4.4 Identificación de genotipos sobresalientes

Integrando todos los resultados de las variables analizadas se pudo identificar a las cruzas de mayor interés para continuar su mejora dentro del programa de Mejoramiento Genético de Maíces Pigmentados y a las poblaciones mejoradas en las que se ha tenido mayor avance mediante la selección y que también pueden continuar dentro del programa.

En el Cuadro 5, se muestra cada genotipo y el número total de características deseables que tuvo. Se consideró que la característica fue deseable cuando el valor de la variable fue superior a la media, y excepcionalmente, en los DFM y en la ASF, la consideración se hizo cuando el valor fue inferior al valor promedio (pues se busca que los genotipos tengan mayor sincronía floral y precocidad).

Cuadro 5. Número de características deseables en maíces pigmentados por antocianinas establecidos en dos localidades de los Valles Altos de México.

Tipo	Genotipo	No. de características
Cruzamientos	P7xP4	3
	P7xP2	5
	P1xP7	7
	P4xP5	2
	P7xP1	3
	P2xP3	2
	P4xP6	1
	P8xP1	5
	P1xP9	3
	P2xP3	4
	Poblaciones mejoradas	PM1
PM2		5
PM3		3
PM4		3

Se encontró que todos los genotipos tuvieron al menos una característica deseable y que como máximo hubo siete características deseables. Tales fueron los casos de la cruce P4xP6 (solamente superó a la media en la variable Lmz) y la cruce P1xP7 (variables: Rto, ASF, P100S, Lmz, Dmz, Pmz e Id), respectivamente.

Con base en el número de características deseables y poniendo como criterio que los genotipos tuvieran al menos tres atributos, se consideraron de interés a todos los genotipos con excepción de: P4xP5, P2xP3, PM1 y P4xP6. Se catalogaron como sobresalientes a las cruces P1xP7, P7xP2, P8xP1, P2xP3 y a la población PM2, que tuvieron entre 4 y 7 características deseables. Entre estos cinco genotipos, la cruce P7xP2 y la población PM2 tuvieron Rto menor al promedio, pero destacaron por algunos componentes del rendimiento como: P100S, Dmz y Pmz (Cuadro 6) y precocidad (Cuadro 6).

Si bien lograr un alto rendimiento se convierte en uno de los principales objetivos de la producción, en los genotipos estudiados ha sido priorizada la expresión de antocianinas y el incremento de su contenido en el grano y en la planta en general: tallos, vainas y hojas; sin embargo, la realidad es que en el desarrollo de germoplasma mejorado se debe encontrar la forma de incrementar el rendimiento de grano y los contenidos de antocianinas.

Dado que la demanda de semilla de maíces pigmentados ha ido en aumento, se considera que como una opción a corto plazo y con base en el rendimiento se podrían recomendar a las cruzas P1xP7, P8xP1 y P1xP9 para el área de los Valles Altos. Estos materiales tuvieron Rto entre 4.9 y 6.6 t ha⁻¹, presentaron un ciclo precoz-intermedio (78-84 días), con plantas de 2.4 m, que destacaron por la longitud de la mazorca (Lmz > 14 cm) y peso de la mazorca (Pmz > 100 g).

Cuadro 6. Valores medios de la expresión de las características agronómicas de los genotipos a través de las localidades.

Genotipo	Rto tha ⁻¹	DFM días	ASF días	AIPta cm	AIMz cm	P100S g	Lmz cm	Dmz Cm	Pmz g	Id %
P7XP4	2.7	75.3	2.5	211.0	120.0	28.5	10.7	4.4	81.2	86.7
P7XP2	3.2	75.7	3.2	218.6	126.4	30.1 **	11.3	4.8 **	102.9	88.0 **
P1XP7	6.2 **	79.2 **	3.0	239.5 **	138.7 **	33.8 **	14.3 **	4.7 **	132.6 **	87.6 *
P4XP5	2.2	75.0	2.7	209.2	130.1	26.3	11.6	4.4	91.0	85.9
P7XP1	1.3	74.5	2.5	198.7	117.5	27.6	10.5	4.3	86.7	89.0 **
P2XP3	3.6	76.3	3.3 **	229.0 **	141.8 **	27.3	11.6	4.5	99.5	86.2
P4XP6	2.5	78.2 **	3.2	224.0	136.5 **	26.0	12.3	4.3	93.0	83.6
P8XP1	6.6 **	78.5 **	3.0	241.0 **	125.8	29.9 **	15.3 **	4.2	117.5 **	84.5
P1XP9	4.9 **	83.8 **	3.3	232.6 **	122.7	23.4	14.3 **	4.4	103.3 *	84.5
P2XP3	3.5	76.5	3.0	228.1 **	139.8	28.0	11.6	4.6 **	105.0 *	89.4 **
PM1	2.7	77.0	3.3 **	229.2 **	137.6 **	26.3	11.6	4.6 **	95.4	87.8 *
PM2	3.0	76.0	3.2	212.9	124.1	31.5 **	11.5	4.6 **	100.8	89.1 **
PM3	3.1	74.8	3.3 **	219.3	134.0	26.4	11.9	4.5	91.8	87.7 *
PM4	0.2	76.8	3.3 **	213.1	127.3	28.0	11.5	4.6 **	101.0	89.3 **
Media	3.47	76.98	3.06	221.9	130.2	28.12	12.16	4.48	100.4	87.10
EE	0.21	0.38	0.08	2.83	2.52	0.59	0.19	0.04	2.89	0.40

** = Genotipos sobresalientes con base en $\mu + 2EE$; EE=Error estándar; Rto: Rendimiento de grano; DFM: Días a floración masculina; ASF: Asincronía floral; AIPta: Altura de la planta; AIMz: Altura de la mazorca; P100S: Peso de 100 semillas; Lmz: Longitud de mazorca; DMz: Diámetro de mazorca; PMz: Peso de la mazorca; Idesg: Índice de desgrane; CV: Coeficiente de variación.

V. CONCLUSIONES

El rendimiento de los genotipos de maíz morado fue restringido en las dos localidades por las condiciones climáticas que esta requiere para su óptimo desarrollo. Los genotipos se comportaron de manera similar en las dos localidades, donde destaca la localidad San Juan por obtener un rendimiento de 4.2 t ha⁻¹.

Las cruzas que tuvieron una mejor expresión de acuerdo a sus características superiores fueron: P1xP7, P8xP1, P1xP9. Con los que se puede seguir en el programa de mejoramiento.

Entre la diversidad del maíz morado existen variantes con características agronómicas y rendimiento destacado; no obstante, sigue siendo necesario incrementar el rendimiento de grano para mejorar la rentabilidad por unidad de superficie.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel, A. E. S., Young, C. J., Rabalski, I. (2006) Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *J. Agric. Food Chem.* 54:4696-4704.
- Acosta, R. (2009) El cultivo de maíz, su origen y clasificación. *El maíz en Cuba. Cultivos Tropicales* 30: 113-120.
- Acquaah, G. (2014) *Principles of plant genetics and breeding.* John Wiley & Sons.
- Aguilar, H. A. D., Salinas, M. Y., Ramírez, D. J. L., Bautista, R. E., Y Flores, L. H. E. (2019). Antocianinas y color en grano y olote de maíz morado peruano cultivado en Jalisco, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(5): 1071-1082.
- Aguilera, O. M., Reza, V. M. del C., Chew, M. R. G., y Meza, V. J. A. (2011). Propiedades funcionales de las antocianinas. *Biotecnia*, 13(2), 16-22.
- Allard, R. W., & Montoya, J. L. (1978) *Principios de la mejora genética de las plantas.* Barcelona: Omega 498 p.
- Arellano, V. J. L., Tut, C. C., María, R. A., Salinas, M. Y. & Taboada, G. O. R. (2003). Maíz azul de los valles altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Rev. Fitotec. Mex.* 26 (2): 101 – 107.
- Arroyo, J., Raez, E., Rodríguez, M., Chumpitaz, V., Burga, J., De la Cruz, W., & Valencia, J. (2007). Reducción del colesterol y aumento de la capacidad antioxidante por el consumo crónico de maíz morado (*Zea mays* L) en ratas hipercolesterolémicas. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 24(2), 157-162.

- Camarena, F., Chura, J. & Blas, R. (2014). Mejoramiento Genético y Biotecnológico de Plantas. Universidad Nacional Agraria de La Molina (UNALM). Lima -Perú. 286 pp.
- Cervantes, O. F., Hernández, E. J., García, R. J. G., Rangel, L. J. A., Andrio, E. E., Mendoza, E. M. & Rodríguez, M.D. (2018). Aptitud combinatoria general y específica de caracteres agronómicos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) de baja endogamia. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 34(1): 33-42.
- Cieza, R. I., Jara, C. T. W., Terrones, M. R., Figueroa, C. Y. C., & Valdera, C. A. (2020). Características agronómicas, componentes de producción y rendimiento de grano de híbridos de maíz (*Zea mays*). *Manglar* 17 (3): 261-267, 2020.
- Cortez, A. M de. J. (2014). "Saneamiento y fitomejoramiento de maíces criollos utilizando la técnica de selección masal estratificada como apoyo al productor indígena salvadoreño". Protocolo de investigación de la Escuela nacional de agricultura. pp 48.
- Coyac-Rodríguez, J. L., Molina-Galán, J. D., García-Zavala, J. J., & Serrano-Covarrubias, L. M. (2013). La selección masal permite aumentar el rendimiento sin agotar la variabilidad genética aditiva en el maíz Zacatecas 58. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(1): 53-62.
- Della, P. D. (1999) Nutritional genomics: manipulating plant micronutrients to improve human health. *Science* 285:375–379.
- Díaz, H. R. S., Ávila, P. M. Á., Espinosa, C. A., y Manjarrez, J. F. J. (2017). Producción artesanal de semilla de maíz azul en el Estado de México.
- Espinosa, T. E., Mendoza, C. M. del C., Castillo, G. F., Ortiz, C. J. & Delgado, A. A. (2010). Aptitud combinatoria del rendimiento de antocianinas y de características agronómicas en poblaciones nativas de maíz pigmentado. *Revista fitotecnia mexicana*, 33(1), 11-19.
- Esquivel, E. G., Castillo, G. F., Hernández, C. J. M., Santacruz, V. A., García, S. G., Acosta, G. J. A., & Ramírez, H. A. (2011). Heterosis en maíz del

- Altiplano de México con diferente grado de divergencia genética. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(3), 331-344.
- Fernández, S. R., Morales, C. L. A., & Gálvez, M. A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36 (Supl. 3-a), 275-283.
- Guadarrama, A., Aragón, F. & Willcox, M. (2014). Mejoramiento de maíces nativos. *Enlace* 5(22):11 -15.
- Guillén, P. L. A., Sánchez, Q. C., Mercado, D. S., Navarro, H. (2002) Análisis de atribución causal en el uso de semilla criolla y semilla mejorada de maíz. *Agrociencia* 36:377-387.
- Guillén, S. J., Mori, A. S. & Paucar, M. L. M. (2014). Características y propiedades funcionales del maíz morado (*Zea mays* L) var. subnigrovioláceo. *Scientia Agropecuaria*, 5(4), 211-217.
- Kato, T. A., Mapes, C., Mera, L.M., Serratos, J.A. y Bye, R.A. (2009). Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 116 pp.
- MacRobert, J. F., Setimela, P. S., Gethi, J., & Worku, R. M. (2015). Manual de producción de semilla de maíz híbrido. México, D.F.: CIMMYT. 36pp.
- MenC, A. Selección masal en el cultivo de maíz. (2011). Manual técnico agrícola 1ª edición, pp 46.
- Mendoza, M. C. G. (2012). Las antocianinas del maíz: su distribución en la planta y producción (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados.
- Mendoza, M. C. G. (2017). Valoración del rendimiento de grano y antocianinas de los maíces morados de Ixtenco, Tlaxcala. (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados.
- Mendoza, M. C. G., Mendoza, C. M. del C., Delgado, A. A., Castillo, G. F., Kato, Y. T. A. & Cruz, I. S. (2017). Antocianinas totales y parámetros de color en líneas de maíz morado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(4), 471-479.

- Morris, M. L., López, P. M. A. (2000). Impactos del Mejoramiento de Maíz en América Latina 1996 – 1997. CIMMYT, México. 45 p.
- Pecina, M. J. A., Mendoza, C. Ma. del C., López, S. J. A., Castillo, G. F., Mendoza, R. M., & Ortiz, C. J. (2011). Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Revista fitotecnia mexicana*, 34(2), 85-92.
- Perales, R., y Hugo, R. (2009). Maíz, riqueza de México *Ciencias*, Núm. 92-93, octubre-marzo, 2009, pp. 46-55 Universidad Nacional Autónoma de México. México. *Ciencias*, (92-93), 46-55.
- Pérez, S. H. F. (2014). Utilización de la antocianina del maíz morado (*Zea Mays L*) y Stevia (*Stevia rebaudiana B*) en la elaboración de un producto tipo mermelada y su aceptabilidad (Tesis de licenciatura en nutrición). Universidad nacional mayor de San Marcos.
- Rabanal, A. M. & Medina, H. A. (2021). Análisis de antocianinas en el maíz morado (*Zea mays L*) del Perú y sus propiedades antioxidantes. *Terra Latinoamericana*, vol.39, pp.1-12.
- Ramírez, D. J. L., Ron, P. J., Sánchez, G. J. de J. & Chuela, B. M. (2000). Selección recurrente en la población de maíz subtropical PABGT-CE. *Agrociencia*, 34(1), 33-39.
- Ruiz, C. J. A., Ramírez, D. J. L., Hernández, C. J. M., Aragón, C. F., Sánchez, G. J. de J., Ortega, C. A., Medina, G. G. & Ramírez, O. G. (2011). Razas mexicanas de maíz como fuente de germoplasma para la adaptación al cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe2), pp: 365-379.
- Salinas, M. Y., Cruz, C. F. J., Díaz, O. S. A. & Castillo, G. F. (2012). Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 33 – 41.
- Salinas, M. Y., García, S. C., Coutiño, E. B., & Vidal, M. V. A. (2013). Variabilidad en contenido y tipos de antocianinas en granos de color azul/morado de poblaciones mexicanas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 36: 285 – 294.

- Salinas, M. Y., Gómez, M. N. O., Cervantes, M. J. E., Sierra, M. M., Palafox, C. A., Betanzos, M. E., & Coutiño, E. B. (2010). Calidad nixtamalera y tortillera en maíces del trópico húmedo y sub-húmedo de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(4), 509-523.
- Salinas, Y., Rubio, D., & Diaz, A. (2005). Extracción y uso de pigmentos del grano de maíz (*Zea mays* L) como colorantes en yogurt. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 55(3): 293-298.
- Sánchez, G. J. J., Goodman, M. M., & Stuber, C. W. (2000). Isozymatic and Morphological Diversity in the Races of Maize of Mexico. *Economic Botany*, 54(1), 43–59.
- SAS, (2009). *Statistical Analysis System*, SAS Institute, Inc. Cary., N. C. USA.
- Secretaria Agricultura y Desarrollo Rural, SADER (2020). Maíz mexicano un alimento con mucho valor. Disponible en línea, https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-mexicano-un-alimento-con-mucho-valor#_ftnref1. Consulta enero 19, 2022.
- Serna, S. S. O., Gutiérrez, U. J. A., Mora, R. S. y García, L. S. (2013). Potencial nutraceutico de los maíces criollos y cambios durante el procesamiento tradicional y con extrusión. *Revista fitotecnia mexicana*, 36:295-304.
- SIAP. (2016). *Anuario Estadístico 2015*. SAGARPA. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx>. Consulta febrero 22, 2022.
- SIAP. (2018). Con los colores del maíz, México se pinta solo. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/con-los-colores-del-maiz-mexico-se-pinta-solo>. Consulta febrero 22, 2022.
- SIAP. (2018). *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Atlas Agroalimentario 2012-2018*, SIAP. 102-104 pp. (2020). *Panorama Agroalimentario*. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Disponible en línea. <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf>. Consulta enero 5, 2022.

- Turrent, F. A., T. A. Wise. & E. Garvey. (2012). Factibilidad de alcanzar el potencial productivo de maíz de México. *Mex. Rural Develop. Res. Rep.* 24:1-36.
- Turturica, M., Oancea, A. M., Râpeanu, G., Bahrim, G. (2015). Anthocyanins: naturally occuring fruit pigments with functional properties. *Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI: Food Technol.* 39: 9-24.
- Villalobos, G. A., López, H. M. B., Valdivia, G. N. A., Arcocha, G. E. & Medina, M. J. (2019). Variabilidad morfológica de maíz nativo (*Zea mays* L.) en la Península de Yucatán, México. *AGROProductividad*, 12(11): 15-21.