

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Estimación de Componentes Genéticos en una Población de Maíz Azul
Mediante el Diseño Carolina del Norte I

Por:

IRMA LETICIA RUIZ GALINDO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Febrero 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Estimación de Componentes Genéticos en una Población de Maíz Azul
Mediante el Diseño Carolina del Norte I

Por:


IRMA LETICIA RUIZ GALINDO


TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

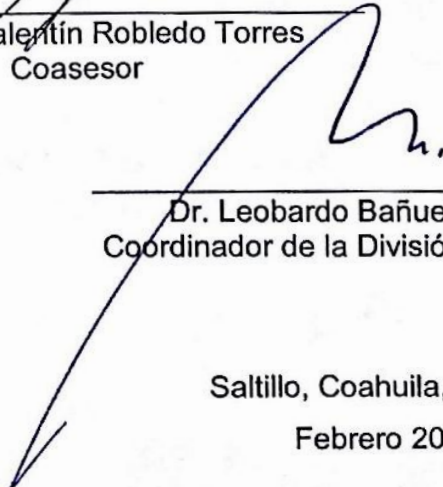
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada


Dr. Humberto De León Castillo
Asesor Principal


Dr. Valentín Robledo Torres
Coasesor


Ing. Raul Gándara Huitrón
Coasesor


Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía
Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Febrero 2015

*Sin importar que tan urbana sea nuestra vida,
nuestros cuerpos viven de la agricultura;
nosotros venimos de la Tierra y retornaremos a ella,
y es así que existimos en la agricultura
tanto como existimos en nuestra propia carne.*

Wendell Berry

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por guiarme, acompañarme y permitirme culminar una etapa importante más en mi vida como es mi carrera profesional, por guiar siempre mis pasos a un mejor camino, por cuidar siempre de mí y de mi familia. Gracias Señor por tantas bendiciones recibidas.

A MI ALMA MATER por abrirme las puertas y ser mi segundo hogar, proveerme de conocimientos para desarrollarme de manera profesional. “Ser buitre es más que ser una simple ave de rapiña, significa saber volar muy alto y ver más allá del horizonte” ¡BUITRES POR SIEMPRE!

Al Dr. Humberto de León Castillo por bríndame su amistad, confianza, por permitirme aprender de sus conocimientos y consejos así como su apoyo y dedicación durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Valentín Robledo Torres por su participación y tiempo dedicado en la revisión de este trabajo de tesis.

Al Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo por su colaboración en la asesoría de este trabajo, así como también por sus consejos y experiencias compartidas.

Al Ing. Raúl Gándara Huitrón por su apoyo durante la toma de datos en campo para la realización de este trabajo, y por su amistad brindada en estos años.

A cada uno de los maestros que estuvieron a lo largo de mi formación académica, gracias por su tiempo, dedicación, consejos, experiencias y sus conocimientos que nos aportan y ayudan a estar más preparados para nuestra vida profesional.

Sr. Felipe y Sra. María Luisa: gracias por sus atenciones, cuidados y apoyo brindado durante estos años, por tendernos la mano cuando lo necesitábamos.

A mis amigos y compañeros de la generación “CVXIII” de quienes me llevare muy buenos y gratos recuerdos: Dulce, Verónica, María, Icela, Sara, Eduardo Martínez, Emir, Víctor, Oscar, Enrique, Arturo, Isidro, Luis, Constantino, Adolfo, Rodolfo, Jorge Alberto, Edgar Omar, Juan Gerardo, Antonio de Jesús, Jesús Hernández, Manuel Treviño, Gregorio, Elver, Juan Bonilla, Eduardo Alonso, Ismael, Eleuterio, Riquelmen, muchas gracias por los momentos compartidos durante estos años, “Dios los Bendiga y éxito en todo lo que realicen”.

En especial a ti: Teodoro Jacobo Hernández, por ser más que un compañero de generación, gracias por tu amistad, tu cariño y sobre todo tu confianza, por estar conmigo en momentos alegría y de tristezas, gracias por tu apoyo en los momentos difíciles. Le agradezco a Dios por esa amistad tan agradable.

Agradezco a todas aquellas personas que en su momento me brindaron su apoyo y amistad incondicional: Ivan, Roger, Chepe, Rocko, Miss, Juan, José Antonio, Noé, José Eduardo, Saúl y demás compañeros que de alguna manera hicieron más amena mi estancia en esta Universidad, de igual forma a los amigos del C.B.T.a 10 por su amistad... Muchas Gracias.

A ti, Eduardo Guzmán, por tantos años de apoyo incondicional, de confianza, por tu paciencia y sinceridad, por bríndame tu cariño, tu tiempo, por compartir momentos buenos y malos, por darme todo y nada menos...Gracias por estar conmigo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

EPIFANIO ANTONIO RUIZ SANTIAGO OBDULIA GALINDO GARCIA

Por todo el amor y el apoyo brindado, porque gracias a ustedes, he llegado a culminar mi carrera profesional, gracias por sus invaluable sacrificios, consejos, dedicación y confianza que en mi depositaron.

A mi Padre: Hoy sólo quiero decirte que eres el ser que más respeto y admiro, gracias por tus sabios consejos, por tus regaños que en su momento no comprendía, pero que hoy agradezco porque has hecho de mí una mejor persona, gracias porque con tu esfuerzo has hecho que no me falte nada. ¡Te quiero mucho papi!

A mi Madre: Hoy quiero darte gracias por todo lo que me has brindado, gracias por ese amor incondicional, porque tus brazos siempre se abren cuando necesito un abrazo, tus palabras han guiado mis pasos, tu fuerza y tu amor me han dirigido por la vida, haciéndome el camino más fácil. ¡Te quiero mucho mami!

A mis Hermanas: Yesenia Angélica, Gisela Trinidad, Mónica Lizbeth; Les agradezco a cada una de ustedes, su cariño, confianza, tiempo, comprensión, y que a pesar de las diferencias que tenemos, saber que siempre contare con ustedes, así como ustedes conmigo. Gracias por tantos momentos de alegría compartidos, así como de tristezas que hemos pasado y que nos han hecho más fuertes. ¡Las quiero mucho niñas!

A mis Abuelos Paternos:

Pedro Anatolio Ruiz Mejía (†) Delfina Santiago Clavel (†); siempre recordaré esos momentos tan maravillosos que viví a su lado, pues los llevó siempre en mi corazón. Sé que desde donde estén guían mis pasos. A años de su partida nunca los olvidaré, los quiero y extraño mucho.

A mis Abuelos Maternos:

Román Hilario Galindo Merino e Inés Sebastiana García; Le agradezco a Dios porque aún están con nosotros, y les agradezco a ustedes ese amor, ese cariño y tiempo del que me siento bendecida al recibir, a ustedes mis respetos y admiración. Los quiero mucho.

A mis tíos(as) porque siempre han estado en momentos importantes de mi vida, gracias por su apoyo y atenciones.

Correo Electrónico; Irma Leticia Ruiz Galindo

Leticia92rg@gmail.com

ÍNDICE DE CONTENIDO

•	ÍNDICE DE CUADROS	ix
I.	INTRODUCCIÓN	1
	Objetivos	4
	Hipótesis	4
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
	Producción y Mejoramiento del maíz criollo	5
	Características y rendimiento del maíz azul	8
	<i>Fusarium</i>	9
	Estimación de componentes de varianza mediante el Diseño I Carolina del Norte	10
	Heredabilidad.....	11
	Índice de selección	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	16
	Material genético	16
	Labores culturales	17
	Evaluación	18
	Diseño experimental	22
	Análisis estadístico del Diseño I	23
	Estimación de parámetros genéticos	24
	Estimación de la Heredabilidad	25
	Estimación del Índice de Selección	26
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
	Componentes de varianza	28
	Índice de selección	34
V.	CONCLUSIONES	40
VI.	RESUMEN	41
VII.	LITERATURA CITADA	42

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadros:

3.1	Estructura del análisis de varianza para el diseño Carolina del Norte I ..	24
4.1	Cuadros medios del análisis de varianza de 11 variables agronómicas evaluadas	28
4.2	Concentración de los estimados de la varianza de machos y de hembras dentro de machos para 11 variables agronómicas evaluadas.....	30
4.3	Estimados de la varianza aditiva y de dominancia para 11 variables evaluadas	31
4.4	Estimados de heredabilidad h^2 para 11 variables agronómicas evaluadas	33
4.5	Análisis de varianza de 220 familias, utilizando como variable de respuesta índice de selección	35
4.6	Tabla de concentración de 220 familias con su índice de selección correspondiente.....	36
4.7	Concentración de las 5 mejores familias superiores experimentales mediante la metodología de IS.....	38

I. INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético y la innovación de sus técnicas son factores cruciales en el aumento de la productividad del maíz, así como de los ingresos de los productores de todo el mundo.

En México, particularmente en las zonas de temporal, la demanda de semillas mejoradas es heterogénea y el resultado de la adopción es incierto (MasAgro, 2012). El mejoramiento genético del maíz es una de las pocas alternativas viables para el incremento de la producción maicera en estas áreas (Angeles, 2012).

El grado de variabilidad alcanzado en el maíz es tal, que en cada nicho ecológico o micro-región donde se cultiva es posible definir un patrón varietal específico (Muñoz, 1991), el cual se conceptúa como un conjunto de variedades desarrolladas por los productores para enfrentar los diferentes regímenes higrotérmicos y condiciones ambientales en los que se desenvuelve sus actividad productiva y en menor medida para responder a los usos tradicionales de cultivo.

Algunos de los elementos principales para definir un patrón varietal de maíz son: la coloración del grano, los niveles de precocidad y otras características agronómicas. La existencia de patrones varietales locales es particularmente evidente en las zonas con un marcado predominio de la agricultura tradicional, en las que un elemento característico lo constituye la utilización de variedades criollas o nativas producidas en condiciones de temporal (Gil *et al.*, 2004).

Wellhausen *et al.* (1951) mencionado por Pérez (2008) señala que el manejo del cultivo de maíz por los agricultores, ha incrementado la diversidad de variedades y a la vez mantenido la identidad y variabilidad genética en forma de poblaciones locales; la selección tradicional que ellos han practicado mejoró el rendimiento o la calidad del grano para usos culinarios específicos, pero al seleccionar visualmente los atributos de la mazorca, inconscientemente han dejado al azar las alturas de planta, mazorca, el acame de tallo, raíz y el número de plantas con esterilidad femenina; un incremento en el valor de algunas de estas variables está relacionado con una disminución en su potencial de rendimiento.

El maíz azul tiene un sabor más intenso, más dulce y más especial que las otras variedades sembradas para el consumo humano. Su consistencia granulada produce una tortilla un poco más densa que las elaboradas con harina de maíz blanco o amarillo. En México hay una gran diversidad de variedades de maíz azul que pertenecen a distintas razas; asimismo existe una gran variabilidad en su tamaño, densidad, dureza de grano y en su composición química (Agama *et al.*, 2011).

A pesar de la existencia de numerosas variedades criollas de maíz azul y ser muy apreciado por los productores de autoconsumo y recientemente por consumidores urbanos, esta variante tiene serias limitantes para su producción y almacenamiento, ya que presenta alta susceptibilidad a las plagas de almacén, rápida pérdida de vigor y viabilidad de sus semillas (Salinas–Moreno *et al.*, 2010).

La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, trabaja en el mejoramiento poblacional del maíz en materiales criollos de la región temporalera que rodea a la institución, intentando fortalecer las buenas características agronómicas que le permiten adaptarse a las difíciles situaciones propias de su régimen hidrotérmico e incrementar la producción por unidad de superficie.

En el presente trabajo de investigación se pretende caracterizar una población de maíz de color azul, usando para ello el diseño Carolina del Norte I, estimando varianzas genéticas; aditivas y dominancia. Esta población tienen la particularidad de estar adaptada a las condiciones naturales y socioeconómicas de los productores de la región circundante a la UAAAN, además posee características que le permite responder a sus gustos alimenticios; con la meta de implementar un programa de mejoramiento tendiente a obtener un rendimiento gradualmente mayor en relación al de la variedad original, sin perder la diversidad genética del material.

Objetivo General:

Estimar varianzas aditivas y de dominancia, de una población de maíz precoz, con grano de color azul en algunas variables agronómicas para determinar en base a los estimados, que estrategia de mejoramiento brindará las mejores respuestas a la selección.

Identificar las familias superiores, auxiliado de la herramienta índice de selección (IS).

Hipótesis:

La estimación de las variables genéticas de la población redundará en la correcta elección de la estrategia de mejoramiento óptimo para cada variable agronómica.

Al menos una familia dentro de la población mostrara mejores efectos genéticos que el resto.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Producción y mejoramiento del maíz criollo

El maíz ha sido y continuará siendo por mucho tiempo el cultivo más importante de México, su primer lugar en área cultivada, volumen, valor de producción y preferencia en la alimentación humana así lo justifican (Angeles, 2012).

El maíz es el cultivo nacional presente en todos los estados, los climas y en todas las altitudes. Se siembran diversas variedades y se consume de distintas formas. Es el principal cultivo, tanto por la superficie que se siembra como por el volumen de producción que se obtiene.

En México ningún otro cultivo tiene tanta importancia como el maíz. Desde la perspectiva productiva, se ubica como el principal cultivo en comparación con el sorgo, trigo, cebada, arroz y avena, los cereales más cultivados en el territorio mexicano. El maíz grano representa 85% del volumen nacional de cereales y 2.8% de la producción mundial Su producción creció en el 2012 a 21.35 millones de toneladas, producción que se había recuperado respecto al 2011, la cual fue afectada por contingencias climatológicas que llevaron a su nivel más bajo en una década, a 17.64 millones de toneladas (SAGARPA, 2013).

El maíz es la principal especie cultivada en México, al ocupar anualmente alrededor de 8 millones de hectáreas. En más del 75 % de esta superficie se utiliza semilla de variedades criollas, las cuales además de estar adaptadas a las condiciones climáticas y tecnológicas de los productores, poseen características que les permiten responder a sus gustos alimenticios y preferencias (SAGARPA, 2013).

En 2010 México registró una producción aproximada de 23 millones de toneladas de maíz. Según la base de datos nacional del Sistema de Información Agropecuaria (SIAP, 2011), cerca del 99,5% de esta producción se comercializó en el mercado en forma de maíz de grano blanco o amarillo, y el 0,5% restante como maíz para especialidades criollas (azul, negro, rojo, morado, el pozolero, el palomero, entre otros).

Las cifras del SIAP sugieren que cada año se producen casi 50.000 t de grano de variedades para especialidades, en comparación con las casi 18, 000.000 t de maíz blanco (SIAP, 2011).

En más del 80% de la superficie cultivada con maíz se siembran semillas criollas que los productores han conservado de sus cosechas por generaciones. Gran parte de la diversidad genética del maíz aún se conserva en manos de los productores; además, los logros del mejoramiento genético han tenido muy poco efecto en muchas regiones maiceras de México (Castillo *et al.*, 2000).

En México se preserva actualmente el cultivo de maíces criollos porque satisfacen necesidades específicas de la población por su adaptación, sabor o color. Además, constituyen la base para la actividad agrícola tradicional y son una fuente de variabilidad para el fitomejoramiento de este primordial cultivo, de modo que es prioritario su conocimiento (Hernández y Esquivel, 2004).

El color de los granos de maíz es un atributo de importancia para los que procesan este cereal, porque determina la aceptación o rechazo por los consumidores, de los productos obtenidos (Salinas *et al.*, 2013).

En 2010, el 80 % de la producción de maíz de colores provino de zonas de temporal (secano), donde el rendimiento promedio es de 1.6 t ha⁻¹, el 20 % restante se produjo en parcelas irrigadas con un rendimiento promedio de 3.8 t ha⁻¹. Según Polanco y Flores (2008), la mayoría del maíz de colores se produce en pequeña escala, en zonas marginadas, y se destina principalmente al consumo doméstico.

En las diferentes regiones productoras de maíz azul se cultivan variedades criollas: en los Valles Altos de la Mesa Central predominan las razas Chalqueño para riego y el Cónico para temporal, aunque también se pueden encontrar Cacahuacintle y Palomero Toluqueño, mientras que en el noroeste la raza que se emplea es Tabloncillo (Salinas *et al.*, 2010; Agama, 2011).

Características y rendimientos de maíz azul

La mayoría de los maíces azules son típicamente de grano harinoso. El endospermo es de textura suave. El color azul se encuentra en la capa de células llamada aleurona, donde una mayor concentración de pigmentos de antocianina hace que los granos parezcan negros (Betrán *et al.*, 2001; Dickerson, 2003).

Las características agronómicas que varían dentro de los maíces azules son: días a floración masculina, femenina, número de hileras por mazorca, largo y ancho del grano (Espinosa *et al.*, 2006). De acuerdo con Antonio *et al.* (2004) existe una notoria variación genética en el intervalo entre floración masculina y femenina que va de 4.4 días a 8 días.

Hay discrepancias en cuanto a los rendimientos por hectárea que se pueden obtener en cultivos de maíz azul, existen datos para zonas sin riego donde se obtienen rendimientos que van de 1.02 a 3.36 t ha⁻¹ (Johnson y Jha, 1993). Sin embargo, se ha probado que el rendimiento de grano de variedades de maíz azul raza Chalqueño varía de 2.9 a 5.4 t ha⁻¹ (Antonio *et al.*, 2004).

De acuerdo con Dickerson (2003), los rendimientos del maíz azul de polinización abierta son relativamente bajos si se comparan contra rendimientos de híbridos comerciales. Arellano *et al.* (2003) reportaron rendimientos de maíces azules que varían de 5.6 a 6.6 t ha⁻¹, donde la floración femenina varía entre 103 y 109 días, que las ubica como variedades de tipo intermedio a tardío. También reportaron que algunas variedades de maíz azul de la raza Cónico Norteño, Gordo y Bolita presentaron rendimientos menores (2.7 t ha⁻¹); rendimiento al que relacionaron con el menor período de floración femenina y menor altura de la planta.

El potencial productivo de las razas de maíz azul ha sido poco evaluado; sin embargo, es importante mencionar los altos rendimientos que se pueden alcanzar, sólo cuando las condiciones de cultivo sean las mejores. Se han detectado rendimientos de hasta 10.5 t ha⁻¹ en maíces azules de raza Chalqueño (Arellano *et al.*, 2003).

Fusarium

La producción de grano de maíz (*Zea mays* L.) es afectada por diversas enfermedades: entre estas destaca, por pérdidas que ocasiona en el rendimiento, la pudrición de la mazorca causada por *Fusarium moniliforme* Sheldon (estado perfecto *Gibberella fujikuroi* Sawada). Además, la ingestión de granos infectados por este hongo puede provocar afectaciones severas en humanos y animales, causada por las diversas y potentes micotoxinas que produce fumonisinas B1 y B2 y fusarinas (Miller *et al.*, 1995).

Debido a que la resistencia genética es el único método eficaz de combatirla, se necesita buscar fuentes de resistencia a esta enfermedad y transferirlo a la variedad o líneas de interés (Cardelas *et al.*, 2001).

Mendoza *et al.* (2003) reportan que la incidencia de enfermedades de la mazorca del maíz está relacionada con la susceptibilidad intrínseca del genotipo, el manejo agronómico y las condiciones ambientales a las que se exponen durante su desarrollo. Las especies de *Fusarium*, como *F. moniliforme* Sheld y *F. graminearum* Schw causan pudrición de tallo y mazorca, tienen amplia distribución y son endémicas en todas las regiones productoras de maíz del mundo.

Payak y Sharma (1985), mencionados por González *et al.* (2007), estimaron que la pérdida de rendimiento que causan las enfermedades del maíz a nivel mundial se encuentra en 7 y 17%, mientras que en México oscila entre 7.5 y 38.0%.

En todas las regiones productoras de maíz del mundo, cada año se presentan enfermedades que afectan el rendimiento y la calidad del grano. En zonas húmedas, las pudriciones de mazorca son importantes, particularmente cuando la precipitación pluvial es mayor que la normal desde la época de la floración hasta la cosecha; en algunas regiones se han registrado daños severos causados por esas enfermedades.

Entre las pudriciones de mazorca más relevantes están las inducidas por especies de *Fusarium*, que además de reducir el rendimiento son causa del deterioro y mala calidad de los granos, y debido a la capacidad de producir micotoxinas también están relacionadas con enfermedades en humanos y en animales que los consumen (García *et al.*, 2010).

Estimación de componentes de varianza mediante el Diseño Carolina del Norte I

Los modelos estadísticos lineales en los que algunos de los componentes son de efectos fijos y otros de efectos aleatorios, se conocen como modelos mixtos (Searle, 1971). Uno de los objetivos del análisis de los modelos mixtos es el de estimar las varianzas de cada uno de los efectos aleatorios, así como sus covarianzas, conocidas como componentes de varianza y covarianza (Corbeil y Searle, 1976; Harville, 1977).

Los Diseños I y II de Carolina del Norte juegan un papel primordial en el mejoramiento genético vegetal para estimar los componentes de varianza genética de una población de referencia (Fehr, 1991). La medición de múltiples características bajo estos diseños permite también la estimación de componentes de covarianza, y las correlaciones fenotípicas y genotípicas entre las características medidas (Hallauer y Miranda, 1988). Tal estimación se ha realizado por ANOVA, puesto que no se han desarrollado los modelos mixtos multivariados para estos diseños (Caballero *et al.*, 2003).

En la investigación teórica sobre diseños de apareamiento para estudiar el problema de la baja precisión que frecuentemente se presenta en la estimación de componentes de varianza genética, se ha identificado una serie de factores que repercuten en la baja precisión, como son los inherentes a la calidad de la técnica experimental y al número de repeticiones en el (los) experimento(s) de evaluación de las familias generadas.

En Diseño Carolina del Norte I se ha hecho referencia a insuficiencias en el tamaño de la muestra de hembras: Márquez y Hallauer (1970) encontraron que es más adecuado el uso de ocho hembras por macho que las cuatro originalmente sugeridas (Comstock y Robinson 1948, 1952; Castellanos, 2000).

Heredabilidad

La heredabilidad de un carácter métrico es una de sus propiedades más importantes, pues expresa la proporción de la varianza total que es atribuible a los efectos medios de los genes y esto es lo que determina el grado de parecido entre parientes (Falconer, 1984).

Robles (1986) menciona que conocer la heredabilidad es de suma importancia, porque es una buena indicación que la selección de los individuos para producir la próxima generación, resultarán en descendientes con fenotipos similares. Además, la heredabilidad sirve para decidir la metodología del mejoramiento a seguir, pues el avance que se logre dependerá de la proporción de V_A (varianza por aditividad) en la característica. Este aspecto se ve mejor si consideramos solamente la proporción V_A con respecto a la V_D (varianza por dominancia) para determinar su importancia y metodología a seguir. Así, sí:

$V_A / V_D < 1$; hacer hibridación.

$V_A / V_D > 1$; hacer selección.

$V_A / V_D = 1$; hacer hibridación o selección.

La heredabilidad (h^2) para una característica dada, determina la ganancia genética de selección y que estrategia de mejoramiento se debe de seguir (Falconer y Mackay, 1996).

No existe una escala definida para clasificar la magnitud de la heredabilidad; pero arbitrariamente se puede considerar la heredabilidad baja de 0 a 0.3; media de 0.3 a 0.7 y alta de 0.7 a 1.0 (Robles, 1986). En cambio, Chávez (1993) señala que la heredabilidad es una característica o rasgo que puede ser cualquier fracción de cero a uno. No estando bien definido lo que se entiende por alta o baja heredabilidad, pero en general son aceptables los siguientes valores:

- a) Alta heredabilidad (mayor de 0.5).
- b) Heredabilidad media (de 0.2 a 0.5).
- c) Baja heredabilidad (menor de 0.2).

Índice de selección

Yáñez (2005) menciona que un índice de selección es la metodología utilizada para hacer selección de manera simultánea por varias características, la cual toma en consideración además de los aspectos genéticos, la importancia económica de las características involucradas. Este índice está conformado esencialmente por dos ecuaciones: la primera, es aquella en la cual se incluyen las características que se desea mejorar, es decir, las que comprenden el objetivo de selección y se denomina genotipo agregado; la segunda se constituye por las características sobre aquellas que se hace la selección, las cuales se denominan criterios de selección.

Soares *et al.* (2011) mencionan que un Índice de Selección (IS), concentra toda la información genética de un reproductor en un solo valor comparativo, seleccionando de manera simultánea varias características y tomando en consideración además los aspectos genéticos, dada la importancia económica de cada una de las características involucradas en dicho IS.

Cerón y Sahagún (2005) indican que existen varios métodos para el mejoramiento genético simultáneo de varios caracteres, y los tres de mayor importancia son: selección en tándem, selección simultánea de caracteres independientes e índices de selección (IS). Los índices de selección permiten separar genotipos con base en la evaluación simultánea de varios caracteres. Cada método tiene una eficiencia diferente y el que proporcione la ganancia genética máxima por unidad de tiempo y esfuerzo es el mejor.

Montes *et al.* (2008) mencionan que el índice de selección se puede estimar de acuerdo con los objetivos de cada sistema de producción. Para ello se debe considerar que cada índice es particular para cada sistema, ya que este va a depender de los parámetros genéticos (heredabilidad y correlaciones), sistema de producción, comercialización y la importancia económica relativa que se le dé a cada carácter en cuestión.

Para Daros *et al.* (2004) los índices basados en la combinación de tres caracteres, en general fueron más eficientes que los índices de dos caracteres. Este resultado podría tener su explicación, en el sentido de que al aumentar en el índice, el número de caracteres correlacionados con el carácter por mejorar, se obtendría mayor avance genético; al respecto, se menciona que el índice de selección fue eficiente para obtener ganancia genética para rendimiento de grano y que la correlación es una medida de la comunidad de genes que gobiernan en común el carácter objeto de la selección y los caracteres del índice.

Restrepo *et al.* (2008) mencionan que es un método de puntaje total en el cual se desarrolla una ecuación de regresión múltiple que da valores óptimos a la importancia económica de cada característica, la heredabilidad de cada característica y a las correlaciones genéticas y fenotípicas entre las características, de manera que permite separar genotipos con base en la evaluación simultánea de varios caracteres y ordenar los genotipos basándose en el valor obtenido.

Castañón *et al.* (2000) argumentaron que fue Smith (1963) quien estableció las bases para la selección de plantas mediante el uso de índices de selección. A este tipo de selección la llamaron función discriminante, que consisten en representar el valor de una planta con una función lineal de sus caracteres involucrados.

Sharma y Duveiller (2003) indican que el uso de un índice de selección (IS) permite superioridad marcada en un rasgo para compensar inferioridad moderada en otro. Es decir, los segregantes inferiores pero con algunos atributos favorables se incluyen en el ciclo de selección, lo cual no puede ser logrado directamente con otros métodos de selección.

El programa de índice de selección desarrollado en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por Barreto *et al.*, (1991), genera una variable llamada índice, que incorpora matemáticamente en un solo valor numérico todas las características expresadas por el usuario, lo ideal es que las variables consideradas para construir este tipo de índice se encuentren lo más cercano al prototipo para cada variable, es decir, la distancia entre el valor observado y el prototipo sea mínima por lo tanto, mientras más pequeño es el valor del índice más cerca se encuentra el genotipo de los criterios deseados, se considera el genotipo superior.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

En la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el año 2012 se realizaron las polinizaciones para tratar de generar las familias requeridas por el diseño de apareamiento de Carolina del Norte I (Comstock y Robinson, 1948), en la población precoz de color azul.

En mayo del 2013 en el campo directo de la UAAAN se sembró un ensayo de rendimiento correspondiente al diseño genético donde se evaluaron 220 entradas, de las cuales 200 son familias de hermanos completos de 50 progenitores masculinos, cruzados con diferente número de hembras (de 3 a 5) y 20 testigos representativos de la población precoz de color azul, bajo un arreglo de alfa- látice con dos repeticiones.

El material genético que constituye la población azul proceden del germoplasma bolita, chabelita, cónico norteño y líneas derivadas de la variedad Cafime. El color azul se obtuvo de una población criolla de la localidad de General Cepeda, Coahuila.

Labores culturales

Siembra

La siembra se llevó a cabo el 21 de mayo de 2013, en forma manual, la parcela experimental consistió en un surco de cuatro metros de largo, con una distancia entre surcos de 85 cm sembrando 35 semillas por surco.

Fertilización

La dosis de fertilización que se empleo fue 120-80-00, en la primera aplicación se incorporó la mitad del Nitrógeno y todo el Fósforo, después de surcar en el primer cultivo se aplicó el resto del Nitrógeno.

Control de malezas

Para el control de las malezas se realizaron deshierbes manuales y aplicando herbicida Arrasina 90 DF (Atrazina) antes de la emergencia del cultivo.

Control de plagas

Las plagas se controlaron aplicando en siembra Furadan 5G, posteriormente se aplicó en forma líquida Lorsban, Malathion y Ambusch 50.

Riegos

Se sembró a tierra venida, dándole cuatro riegos dependiendo de las necesidades de agua del cultivo.

Evaluación

La evaluación de las 220 familias se realizó en el campo directo de la UAAAN (Bajío) ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila con las coordenadas correspondientes a 25° 212´ Latitud Norte y 101°2´ Longitud Oeste con una altitud de 1730 msnm, una temperatura media anual de 17.7°C y una precipitación pluvial anual de 228.6 mm.

Variables a considerar

Las características agronómicas que se evaluaron en el presente ensayo fueron las que se consideran de mayor importancia para efectuar la selección de los materiales evaluados, siendo tales características las que a continuación se describen brevemente.

Días a floración macho (DFM)

Días transcurridos a partir de la fecha de siembra hasta que el 50 por ciento de plantas presentaron derrame de polen.

Días a floración hembra (DFH)

Días transcurridos de la fecha de siembra hasta que el 50 por ciento de los jilotes presentaron estigmas visibles.

Altura de planta (ALPTA)

Comprende la media que nos arroja el muestrear diez plantas al azar por parcela y medirlas desde la base del tallo hasta la inserción de la hoja bandera, se expresa en centímetros.

Altura de mazorca (ALMAZ)

Promedio de diez plantas muestreadas al azar por parcela, medidas desde la base del tallo hasta la inserción de la mazorca principal, expresada en centímetros.

Acame de raíz (ACRA)

Número de plantas inclinadas más de 30 grados respecto a la vertical sobre el total de plantas.

Acame de tallo (ACTA)

Número de plantas quebradas debajo de la mazorca sobre el total.

Mala cobertura (MACO)

Número de plantas cuyo totemoxtle no cubre el total de la mazorca.

Plantas con *Fusarium spp* (PLFUS)

Número de plantas que se observaron total o parcialmente dañadas por este hongo en cada parcela, evaluadas con respecto al total de las plantas establecidas.

Calificación de planta

Calificación visual de las plantas por parcela útil que considera porte, sanidad y uniformidad. La escala va de 1 a 5 (1 muy buena, 5 muy mala).

Calificación de mazorca

Calificación visual en base al total de mazorcas cosechadas por parcela útil que considera llenado de grano, sanidad, tamaño uniformidad y color de mazorca. Tomando una escala de 1 a 5; donde: 1 corresponde a lo mejor, más sano y uniforme; y el 5 corresponde a lo peor y más variable.

Color

Calificación visual que se tomó una escala de 1 a 5, donde el 1 representa un color azul más intenso y el 5 corresponde a la ausencia de color.

Prolificidad

Es el porcentaje del número de mazorcas cosechadas entre el número de plantas cosechadas.

Peso de campo (PC)

Peso expresado en kilogramos del total de las mazorcas cosechadas por parcela útil.

Porcentaje de humedad (% HUM)

Se tomó un número de mazorcas representativas de la parcela, de las cuales se desgranaron de 3 a 5 hileras para obtener cerca de 250 gramos; esta muestra se somete a medición en un aparato Dickie John, que determina la humedad del grano. Esta actividad se realizó en campo al momento de la cosecha.

Numero de mazorcas cosechadas

Dato correspondiente al total de mazorcas cosechadas dentro de cada parcela útil.

Rendimiento t/ha (REND)

Del total de mazorcas cosechadas por parcela útil se tomó aleatoriamente una muestra representativa de 250 gramos de semilla. Calculándose el por ciento de materia seca por diferencia con el 100 por ciento.

El peso seco (PS) fue estimado multiplicando el porcentaje de grano seco por el peso de campo (PC).

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

Finalmente, el rendimiento en mazorca al 15.5 por ciento de humedad, se obtuvo al multiplicar el peso seco por el factor de conversión (FC) a ton/ha.

Donde:

$$FC = \frac{10,000m^2}{APU \times 0.845 \times 1000}$$

APU = Área de parcela útil, determinado por la distancia entre surcos por la distancia de estos y por el número de plantas por parcela.

0.845 = Constante para obtener el rendimiento 15.5 por ciento de humedad.

1000 = Coeficiente para obtener el rendimiento en t ha⁻¹

10,000 m² = Equivalencia a una hectárea.

Debido a que en el experimento durante la cosecha no se contó con el número de plantas establecidas por parcelas se realizó un análisis de covarianza para subsanar este déficit, usando el número de plantas como covariable, cuyo resultado mostro un efecto significativo, por lo que el número de plantas fue utilizado para corregir el rendimiento del grano en el rendimiento a través de la siguiente fórmula:

$$\hat{Y}_i = Y_i - \beta (x_i - \bar{x})$$

Donde:

\hat{Y}_i = Rendimiento ajustado;

Y_i = Rendimiento observado;

β = Coeficiente de regresión

X_i = Número de plantas cosechadas

\bar{x} = Media del número de plantas cosechadas.

Diseño experimental

Las entradas fueron evaluadas bajo un diseño de bloques incompletos al azar con 2 repeticiones siendo la unidad experimental de un surco de cuatro metros con 35 plantas.

Siendo el modelo lineal para el análisis el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Valor observado para el i-ésimo tratamiento en la j-ésima repetición.

μ = Media general.

α_i = Efecto de la i-ésimo tratamiento.

β_j = Efecto de la j-ésima repetición.

ε_{ij} = Efecto del error experimental

Para conocer si los datos obtenidos en el análisis de varianza son confiables, se determinó el coeficiente de variación (C.V.) de la siguiente manera:

$$C.V = \frac{\sqrt{CME}}{X}$$

Donde:

CME = Cuadrado medio del error.

X = Media general.

Análisis estadístico del Diseño Carolina del Norte I

Para utilizar el diseño, se sembraron 220 entradas provenientes de las polinizaciones de la población precoz de color azul.

Siendo el Modelo Genético el siguiente:

$$G_{ijk} = \mu + m_i + h_j + r_k + e_{ijk}$$

Donde:

G_{ijk} = Expresión fenotípica del cruzamiento del i-ésimo macho y la j-ésima hembra en la k-ésima repetición.

μ = Media general.

m_i = Efecto del i-ésimo macho (i: 1,2,...m).

h_j = Efecto de la hembra j-ésima apareada al macho i-esimo (ij: 1,2,...h).

r_k = Efecto de repeticiones

E_{ijk} = Efecto del error experimental.

En base al modelo anterior descrito en el cuadro 3.1 se constituye el análisis de varianza para el Diseño Genético

Cuadro 3.1 Estructura del análisis de varianza para el Diseño Carolina del Norte I.

F.V.	G.L.	ECM	CM
Repeticiones (Rep)	r-1	$\sigma^2_e + \sigma^2_r$	
Machos (M)	m-1	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{H/M} + rh\sigma^2_M$	M3
Hembras/machos (H)/M	m(h-1)	$\sigma^2_e + r\sigma^2_{H/M}$	M2
Error	(mh-1)(r-1)	σ^2_e	M1
Total	mhr-1		

La estimación de los componentes de interés del Diseño I a partir de las esperanzas del cuadrado medio y considerando que no hay epistásis, es la siguiente:

$$\sigma^2_M = \frac{M3 - M2}{rh} \qquad \sigma^2_{H/M} = \frac{M2 - M1}{r}$$

Estimación de parámetros genéticos

La estimación se realizó a partir de las componentes de interés de los cuadrados medios del ANVA del diseño I.

Para el caso de la estimación de componentes de varianza genética, como son la varianza aditiva (σ^2_A) y la varianza de dominancia (σ^2_D), se parte de la forma en que se aparearon los machos y hembras, ya que la varianza de macho expresa la covarianza de familias de medios hermanos (MH) y la varianza de hembras es función de la covarianza de familias de hermanos completos (HC).

Lo anterior se expresa a continuación.

$$\text{Cov (MH)} = \sigma^2_M = \frac{1}{4} \sigma^2_A$$

$$\therefore \sigma^2_A = 4 \sigma^2_M$$

$$\text{Cov (HC)} = \sigma^2_M + \sigma^2_{H/M}$$

$$\sigma^2_{H/M} = \text{Cov (HC)} - \text{Cov (MH)}$$

$$\therefore = \frac{1}{2} \sigma^2_A + \frac{1}{4} \sigma^2_D - \frac{1}{4} \sigma^2_A$$

$$\therefore = \frac{1}{4} \sigma^2_A + \frac{1}{4} \sigma^2_D$$

$$\sigma^2_D = 4 (\sigma^2_{H/M} - \sigma^2_M)$$

$$\sigma^2_F = \sigma^2_A + \sigma^2_D + \frac{\sigma^2_E}{r}$$

Estimación de la heredabilidad

A partir de los componentes de varianza estimados, se calcularon los valores porcentuales de heredabilidad mediante la siguiente fórmula:

$$h^2 = \frac{\sigma^2_A}{\sigma^2_F}$$

Índice de selección (IS)

La selección de caracteres múltiples se basa en un índice en el que los valores fenotípicos estandarizados de cada característica se les resta un valor crítico correspondiente al valor más favorable de la variable (con la idea de medir la distancia entre ambos, el resultado se eleva al cuadrado para evitar valores negativos), después se multiplica por su valor económico, se suman los componentes del índice y posteriormente se calcula su raíz cuadrada.

En esta investigación se consideraron cuatro caracteres: (humedad, color, plantas con *Fusarium* y rendimiento) se utilizó el método de índices de selección desarrollado por Barreto *et al.* (1991), cuya fórmula y metodología se describen a continuación.

$$IS = [(Y_i - M_i)^2 * l_i] + [(Y_j - M_j)^2 * l_j] + \dots + [(Y_n - M_n)^2 * l_n]^{1/2}$$

Dónde:

IS = es el índice de selección;

$Y_i \dots n$ = Es el valor de la variable de interés en unidades Z;

Las variables que fueron incluidas en la construcción del índice de selección se encontraban con valores distintos (toneladas, calificación, porcentajes, etc.), por lo que fue necesario estandarizar cada uno de ellos y de esta forma las características pudieran combinarse; la estandarización se llevó a cabo mediante la fórmula del valor de Z que a continuación se describe:

$$Z = \frac{Y_j - \hat{Y}}{S}$$

$Z_j = \frac{Y_j - \bar{Y}}{S}$ es el valor estandarizado; Y_j es el valor observado para la variable j ; \bar{Y} es el promedio de todos los valores observados de la variable; S es la desviación estándar de la variable.

$M_{i..n}$ = es la meta de selección en valores z (es la razón existente entre la diferencia de la media y el valor más favorable de la población para esa variable entre la desviación estándar estimada para la variable en cuestión).

La meta toma valores de -3 a +3 que corresponde a un 99 por ciento dentro de una distribución normal.

$li..n$ = Es la intensidad de selección (definido por el usuario) para las características j_1, \dots, j_n .

La intensidad de selección: es el grado de importancia que se le asignan a cada una de las variables de acuerdo al interés, tomando valores que van de 0 a 10. El valor de intensidad más pequeño (1) es asignado a la variable de menor interés y el valor más alto (10) representa la variable de mayor importancia, o en su caso si se usa un valor de (0) es porque no se quiere que esa variable sea considerada y por lo tanto en el programa SAS no se toma en cuenta al analizar los datos.

Criterio de selección:

Entre más grande sea el valor del índice más alejado se encuentra del genotipo con los criterios establecidos. El genotipo que obtenga el valor del índice de selección más pequeño es considerado como superior, ya que reúne la mayoría de los caracteres requeridos en la selección.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos establecidos en el presente trabajo de investigación así como también, rechazar o no las hipótesis planteadas, en este capítulo se presentan los resultados estadísticos y discusión obtenidos de los análisis genéticos realizados en las variables agronómicas evaluadas, bajo el Diseño de apareamiento anidado de Carolina del Norte I, en la localidad del Bajío de la UAAAN, en Saltillo, Coahuila.

Componentes de varianza

En el Cuadro 4.1 se encuentran los cuadrados medios obtenidos del análisis de varianza que se realizó en forma individual para cada variable, que se utilizaran para obtener los componentes de la varianza genética y así caracterizar a la población en estudio.

Cuadro 4.1 Cuadrados medios del análisis de varianza de 11 variables agronómicas.

FV	GL	% HUM	GL	DFM	DFH	GL	ALPTA	ALMAZ
Repeticiones	1	1.681NS	1	0.545NS	0.004 NS	1	8080.979**	1980.064**
Machos (M)	49	7.233NS	49	8.313**	10.651**	49	378.876NS	300.959NS
Hembras (H)/M	152	7.136NS	152	4.338NS	4.762NS	151	391.934*	302.655*
Error	167	5.708	197	4.025	5.165	193	285.317	234.774
Total	369		399			394		
C.V		13.001		3.035	3.331		10.128	17.561

FV	GL	ACRA	ACTA	MACO	PLFUS	COLOR	REND
Repeticiones	1	1.153 NS	754.439 **	1.047NS	276.486**	26.189**	9.403*
Machos	49	3.265 NS	38.400 **	1.268NS	14.098NS	2.623**	2.545NS
Hembras H/M	152	2.883 NS	26.592 NS	1.054NS	10.680NS	1.454**	2.589NS
Error	197	3.302	22.125	1.036	10.165	0.933	2.410
Total	399						
C.V		143.366	85.796	138.963	90.772	30.246	29.682

**=altamente significativo 0.01 de probabilidad,* =significante 0.05 de probabilidad, NS= no significativo, FV= fuentes de variación, GL= grados de libertad, % HUM= porcentaje de humedad, DFM= días a floración macho, DFH= días a floración hembra, ALPTA= altura de planta, ALMAZ= altura de mazorca, ACRA= acame de raíz, ACTA= acame de tallo, MACO= mala cobertura, PLFUS= plantas con *Fusarium*, COLOR = color de grano, REND= rendimiento, CV= coeficiente de variación.

La fuente de variación repeticiones detectó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en las variables ALPTA, ALMAZ, ACTA, PLFUS, COLOR, mientras que para la variable REND se presentó diferencia significativa ($P \leq 0.05$). Se infiere que estas diferencias son atribuibles a los bloques así como al manejo agronómico del experimento. Las variables restantes no mostraron diferencias significativas.

Para la fuente de variación de machos (M) encontramos diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en las variables DFM, DFH, ACTA y COLOR, esta variación se infiere es debida a que cada macho muestra diferente comportamiento genético, la diferencia detectada es de suma importancia para discriminar lo más sobresalientes y con buen atributo agronómico. En el resto de las variables no se encontraron diferencias significativas.

Para la fuente de variación de hembras dentro de macho H/M, la variable que presento diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) fue COLOR, las que presentaron diferencia significativa ($P \leq 0.05$) fueron las variables de ALPTA y ALMAZ, mientras que en las variables restantes no se encontró diferencias. Esta variación pudo deberse a que las familias de hermanos completos tuvieron diferente fondo genético para estas características en el ambiente de evaluación.

En el Cuadro 4.2 se presentan los estimados de las varianzas de machos así como de hembras dentro de machos que son usados como base para estimar los parámetros genéticos de la población en estudio.

Cuadro 4.2 Concentración de los estimados de la varianza de machos (σ^2_M) y de hembras dentro de machos ($\sigma^2_{H/M}$) para 11 variables agronómicas evaluadas.

	% HUM	DFM	DFH	ALPTA	ALMAZ	COLOR
σ^2_M	0.01	0.53	0.79	-1.76	-0.22	0.15
$\sigma^2_{H/M}$	0.715	0.155	-0.2	53.30	33.94	0.26

	ACRA	ACTA	MACO	PLFUS	REND
σ^2_M	0.05	1.59	0.02	0.46	-0.005
$\sigma^2_{H/M}$	-0.21	2.235	0.01	0.26	0.0895

% HUM= porcentaje de humedad, DFM= días a floración macho, DFH= días a floración hembra, ALPTA= altura de planta, ALMAZ= altura de mazorca, COLOR = color de grano, ACRA= acame de raíz, ACTA= acame de tallo, MACO= mala cobertura, PLFUS= plantas con *Fusarium*, REND= rendimiento, σ^2_M = varianza de macho, $\sigma^2_{H/M}$ = varianza de hembra dentro macho.

Para las variables días a floración macho (DFM), días a floración hembra (DFH), acame de raíz (ACRA), mala cobertura (MACO), plantas con *Fusarium* (PLFUS), la varianza de macho es mayor que la varianza de hembras dentro de machos, lo que por consecuencia dará que la varianza σ^2_D sea menor para estas cinco variables ya que la varianza de hembras dentro de machos $\sigma^2_{H/M}$ se le resta a la varianza de machos.

Mientras que para las variables de humedad (HUM), altura de planta (ALPTA), altura de mazorca (ALMAZ), color, acame de tallo (ACTA) y rendimiento (REND) la varianza de hembras dentro de macho fue mayor, siendo un indicador de que el tipo de acción génica presente en estas variables está más controlado por la varianza de dominancia.

Cuadro 4.3 Estimados de la varianza aditiva (σ^2_A) y de dominancia (σ^2_D) para 11 variables evaluadas.

	% Humedad	DFM	DFH	ALPTA	ALMAZ	COLOR
σ^2_A	0.05	2.15	3.18	-7.05*	-0.91*	0.63
σ^2_D	2.82	-1.5*	-3.96*	220.28	136.64	0.44
σ^2_E	5.70	4.02	5.16	285.31	234.77	0.93

	ACRA	ACTA	MACO	PLFUS	REND
σ^2_A	0.205	6.38	0.11	1.84	-0.02*
σ^2_D	-1.04*	2.58	-0.04*	-0.8*	0.378
σ^2_E	3.30	22.12	1.03	10.16	2.41

% HUM= porcentaje de humedad, DFM= días a floración macho, DFH= días a floración hembra, ALPTA= altura de planta, ALMAZ= altura de mazorca, COLOR = color de grano, ACRA= acame de raíz, ACTA= acame de tallo, MACO= mala cobertura, PLFUS= plantas con *Fusarium*, REND= rendimiento, σ^2_A = varianza aditiva, σ^2_D =varianza de dominancia, σ^2_E =varianza del error.

*Estos valores son considerados como cero

La explotación racional y eficiente de la variación genética presente en las poblaciones es esencialmente importante en el éxito de los programas de mejoramiento. Debido a esta consideración es importante conocer la naturaleza de la variación genética (Del Campo, 1980).

Existen varios métodos de mejoramiento y la aplicación del esquema adecuado dependerá de la varianza genética presente mayormente en cada carácter analizado.

Por lo tanto, para las variables días a floración macho (DFM), días a floración hembra (DFH), color, acame de raíz (ACRA), acame de tallo (ACTA), mala cobertura (MACO) y plantas con *Fusarium* (PLFUS) donde, la σ_A^2 fue mayor que la σ_D^2 , lo cual es una evidencia de que existe una mayor contribución de alelos que se transmiten de una generación a otra para estas variables, y que muestra características de que son heredables. La población se debe de someter a un programa de selección recurrente para explotar la variabilidad genética de tipo aditiva, en donde se espera habrá mayor ganancia genética para dichas variables.

Cuando la varianza de dominancia se presentó en mayor proporción como en las variables: humedad (HUM), altura de planta (ALPTA), altura de mazorca (ALMAZ) y rendimiento (REND) se puede dirigir el mejoramiento hacia programas de endogamia-hibridación. Sin embargo, si se quieren mejorar la porción de la varianza aditiva de estas características, se sugiere utilizar un programa de selección recíproca recurrente ya que esta metodología se puede aplicar cuando están presentes los dos tipos de acción génica como en éste caso, o bien selección recurrente bajo las metodologías S1, S2.

Según Falconer (1984), la varianza genotípica se compone de varianza aditiva, dominante (o de dominancia) y de interacción (o epistática); de éstas la más importante es la varianza aditiva (varianza de los valores reproductivos), ya que es la causa principal del parecido entre parientes y determinante de las propiedades genéticas observables de la población (heredabilidad y correlación genética aditiva) y de la respuesta positiva a la selección.

Con estos resultados se detectó que existe variabilidad para que mediante la aplicación de un método de mejoramiento adecuado por variable será posible obtener ganancias genéticas.

Cuadro 4.4 Estimados de heredabilidad h^2 para las once variables agronómicas evaluadas.

	% Humedad	DFM	DFH	ALPTA	ALMAZ	COLOR
σ^2_F	5.72	4.16	5.76	362.938	254.025	1.538
h^2	0.0087	0.51	0.55	-0.01	-3.582	0.40

	ACRA	ACTA	MACO	PLFUS	REND
σ^2_F	1.85	20.02	0.625	6.92	1.583
h^2	0.11	0.31	0.176	0.26	-0.01

% HUM= porcentaje de humedad, DFM= días a floración macho, DFH= días a floración hembra, ALPTA= altura de planta, ALMAZ= altura de mazorca, COLOR = color de grano, ACRA= acame de raíz, ACTA= acame de tallo, MACO= mala cobertura, PLFUS= plantas con *Fusarium*, REND= rendimiento, σ^2_F = varianza fenotípica, h^2 = heredabilidad.

En el Cuadro 4.4 se muestra los valores de heredabilidad que se obtuvieron de la población, los cuales se mostraron alta para las variables de DFM (0.51) y DFH (0.55), por lo tanto, son con los que se pueden lograr mayores avances y en menor tiempo aplicando una estrategia de mejoramiento sencilla cómo selección masal.

Los valores de heredabilidad de las variables COLOR (0.40), ACTA (0.31) y PLFUS (0.26) se encuentran en un rango medio, mientras que las variables restantes muestran heredabilidad baja, sus valores están por debajo de 0.2, esto indica que es adecuado aplicar estrategias de selección recurrente para el mejoramiento de los caracteres de esta población y así obtener materiales con un porte adecuado.

Índice de Selección

Tal como se indicó en el capítulo de materiales y métodos, la elección de las familias con mayor potencial fue con base en los valores arrojados por el índice de selección, en el cual se tomaron en cuenta 4 variables (%HUM, COLOR, PFUS y REND).

Con los resultados del valor del índice de selección estimado por familia dentro de repetición, fue posible modelar la variable de respuesta IS para realizar un análisis de varianza y así poder contrastar la hipótesis de que hay diferencia entre los valores de IS para las familias; los resultados se resumen en el Cuadro 4.5.

Cuadro 4.5 Análisis de varianza de 220 familias. Utilizando como variable de respuesta índice de selección.

FV	GL	SCM	CM
REP	1	805.653	805.653**
ENT	219	2792.422	12.750**
ERROR	185	1456.888	7.875
TOTAL	405	5066.192	
CV	19.614		
MEDIA	14.307		
DESVEST	2.806		

FV= fuente de variación, GL= grados de libertad, SCM= suma de cuadrados medios, CM= cuadrados medios, REP= repetición, ENT= entrada, CV= coeficiente de variación, DESVEST= desviación estándar.

En la fuente de variación repeticiones se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), lo que significa que las repeticiones no se comportan de manera similar.

En la fuente de variación de entrada hubo diferencias altamente significativas para la variable de respuesta (IS) ($P \leq 0.01$), lo que indica que entre las familias al menos una posee valores de IS superior al resto, lo cual es favorable, ya que lo que se busca es variabilidad para poder hacer una buena selección.

A partir del Cuadro 4.6, en el cual se presentan los valores del índice de selección se procedió a seleccionar aquellos que presentaran un valor de índice más favorable que en este caso son las familias con IS menores.

Cuadro 4.6 Tabla de concentración de 220 familias con su índice de selección correspondiente

FAM	IS	FAM	IS	FAM	IS	FAM	IS
1	15.58885	56	18.5213	111	12.1697	166	13.345
2	14.2773	57	13.56595	112	15.8471	167	13.24735
3	12.84025	58	15.87565	113	11.19095	168	14.9882
4	15.0848	59	14.18685	114	12.71495	169	10.04775
5	13.4275	60	17.427	115	15.87055	170	9.9554
6	14.0545	61	16.9232	116	15.87715	171	9.72825
7	15.42085	62	14.1314	117	11.9744	172	10.2701
8	17.49815	63	20.28875	118	15.098	173	16.7061
9	9.2514	64	14.358	119	15.13945	174	16.6713
10	12.45335	65	13.48995	120	12.16655	175	11.40245
11	12.71445	66	15.39945	121	12.0434	176	9.3221
12	17.8985	67	13.4049	122	13.2286	177	20.28775
13	20.10755	68	11.1647	123	12.0099	178	18.07585
14	11.9647	69	6.5275	124	15.60945	179	16.31735
15	13.5849	70	14.0273	125	18.9436	180	17.0743
16	16.9451	71	17.4142	126	14.94005	181	13.2308
17	13.5808	72	14.50095	127	13.20455	182	15.59875
18	17.2498	73	12.89505	128	14.0109	183	13.9362
19	14.9127	74	15.0181	129	14.6069	184	16.0674
20	13.63315	75	17.2069	130	13.6937	185	12.3019
21	16.81265	76	15.5155	131	17.86645	186	11.47365
22	14.94145	77	13.20385	132	15.30835	187	12.086
23	12.371	78	16.66555	133	13.5041	188	7.9919
24	13.99845	79	12.37555	134	12.5065	189	10.6956
25	18.75655	80	21.0235	135	15.74835	190	14.65565
26	11.9189	81	14.1429	136	12.32185	191	13.2872
27	14.4165	82	11.8959	137	15.36605	192	7.0156
28	10.20265	83	16.4578	138	17.7383	193	12.13595

29	12.2892	84	19.02445	139	13.69555	194	15.4387
30	16.62975	85	18.34245	140	10.2281	195	9.4764
31	10.86685	86	13.2774	141	17.81635	196	13.72675
32	11.86975	87	11.8607	142	11.8355	197	7.1349
33	16.7715	88	13.4987	143	13.90095	198	17.6218
34	15.99195	89	17.6597	144	16.08485	199	11.9293
35	14.28045	90	14.21765	145	16.1442	200	14.39715
36	13.24065	91	15.09795	146	17.8433	201	15.09505
37	12.7762	92	11.39905	147	17.74455	202	17.094
38	8.8245	93	17.9511	148	17.8811	203	16.8492
39	13.32255	94	11.0502	149	13.5224	204	16.25775
40	12.27965	95	13.4036	150	14.1471	205	16.48345
41	12.6364	96	13.7894	151	14.52425	206	12.4788
42	15.6937	97	19.82485	152	16.0856	207	11.3651
43	15.84905	98	20.03155	153	15.4001	208	13.5219
44	14.5898	99	9.20385	154	8.4193	209	15.256
45	15.1701	100	22.5318	155	12.7069	210	15.87
46	15.1226	101	10.942	156	12.7479	211	19.2537
47	15.432	102	15.15615	157	15.48635	212	20.1998
48	16.07875	103	13.40825	158	11.47925	213	16.1222
49	10.15205	104	15.8432	159	12.57085	214	16.8941
50	14.9484	105	11.1678	160	13.13115	215	15.867
51	15.4238	106	12.47965	161	11.70065	216	12.43555
52	15.97435	107	12.9449	162	11.204	217	15.1583
53	12.0262	108	11.4583	163	17.0879	218	13.5517
54	11.83695	109	13.9384	164	15.55255	219	12.11185
55	14.3237	110	11.41875	165	13.6542	220	12.719

Esto se realizó al obtener el valor crítico, el cual resultó ser de 8.694, este se obtuvo al restar 2 desviaciones estándar a la media del IS, lo que representa el 5 por ciento de la población, esto para identificar cuales individuos son estadísticamente superiores a la media. Cabe mencionar que los individuos con un índice de selección más cercano a cero serán los mejores. Lo que da como resultado que las líneas muestren una mayor respuesta a la selección.

La selección no solo debe enfocarse en una sola característica, normalmente rendimiento, ya que se descuidan otras variables de importancia agronómica, y por tanto la selección no es la más eficiente; en este caso haciendo uso de un IS básico se eligieron las mejores familias por exhibir un IS con valor al mérito favorable, estos al estar más cercanos al criterio de selección de cada variable y por la conjunción de todas obtuvieron los valores más bajos, según Barreto *et al.* (1991) se les considera como superiores, como se observa en los resultados del Cuadro 4.7

Cuadro 4.7 Concentración de las 5 mejores familias superiores experimentales mediante la metodología de IS.

Orden	GEN	ENT	% HUM	COLOR	PFUS	REND	IS
1	14X69	69	18.3	1	2	8.967	6.5275
2	46X192	192	17.5	1	1	8.66	7.0156
3	49X197	197	17.6	3	1	9.858	7.1349
4	45X188	188	16.3	3	4	8.771	7.9919
5	34X154	154	14.9	2	1	5.965	8.4193
Media IS	14.24707						
Valor Min IS	6.5275						
Valor Max IS	22.5318						

GEN= genealogía, ENT= entrada, % HUM= porcentaje de humedad, COLOR = color de grano, PFUS= plantas con *Fusarium*, REND= rendimiento, IS= índice de selección

La familia 69 muestra el mejor valor a mérito del índice de selección con 6.5275, siendo más cercano a cero, su genealogía es la 14x69 formando parte del grupo estadísticamente superior, aunque no presentan el más bajo contenido de humedad, tiene buena sanidad de plantas, su rendimiento es muy aceptable, la principal razón por la cual se encuentra en el primer lugar es por su calificación en cuanto a color, ya que se le asignó mayor prioridad de acuerdo a su valor económico.

Se observan valores que no van en un orden ascendente, esto se debe a que el índice de selección se guía por la intensidad que se le otorgó a cada variable así toma en cuenta en primer término las de mayor importancia económica dejando de lado aquellos no menos importantes, estos resultados atienden el segundo objetivo y se acepta que se pueden detectar familias superiores con buenos atributos agronómicos con las que se puede seguir trabajando en el mejoramiento de esta población.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos en el presente trabajo, se tienen las siguientes conclusiones:

- En la población de maíz azul las variables días a floración macho, días a floración hembra, color, acame de raíz, acame de tallo, mala cobertura y plantas con *Fusarium*, la varianza aditiva fue mayor que la varianza de dominancia por lo cual se sugiere someter a un programa de selección recurrente en donde se espera habrá mayor ganancia genética.
- En las variables donde la varianza de dominancia se presentó en mayor proporción: humedad, altura de planta, altura de mazorca, plantas con *Fusarium* y rendimiento se puede dirigir el mejoramiento hacia programas de endogamia-hibridación. Sin embargo, se sugiere utilizar un programa de selección recíproca recurrente o bien selección recurrente bajo las metodologías S1, S2, para mejorar todas las características.
- Se encontraron familias superiores con buenos atributos agronómicos en cuanto a las características evaluadas, con las que se puede seguir trabajando en el mejoramiento de esta población.

VI. RESUMEN

Es importante que el mejoramiento poblacional de maíz cuente con estrategias de selección que le permitan desarrollar e identificar materiales más estables y efectivos, con atributos agronómicos superiores a la media de la población original. El presente estudio consistió en realizar una exploración genética de algunas variables agronómicas bajo el diseño genético Carolina del Norte I de una población precoz de color azul, ya que estas plantas tienen la particularidad de estar más adaptadas a las condiciones naturales y socioeconómicas de los productores, además poseen características que les permiten responder a sus necesidades pecuarias y gustos alimenticios. Los objetivos de esta investigación fueron: i) Estimar varianzas aditivas y de dominancia en variables de interés. ii) Identificar las familias superiores, auxiliado de la herramienta índice de selección (IS). El experimento se realizó en el campo Bajío de la UAAAN, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila; donde se evaluaron 220 familias de hermanos completos de 50 progenitores masculinos cruzados con diferentes hembras y 20 testigos representativos de la población, utilizando el diseño de bloques incompletos con arreglo alfa- látice con dos repeticiones. Los valores de la varianza aditiva fueron mayores a los de dominancia en las variables: días a floración macho, días a floración hembra, color, acame de raíz, acame de tallo, mala cobertura y plantas con *Fusarium*. En estas variables la población se debe de someter a un programa de selección recurrente, para explotar la variabilidad genética de tipo aditiva. La varianza de dominancia se presentó en mayor proporción en las variables: humedad, altura de planta, altura de mazorca y rendimiento, dirigiendo así el mejoramiento hacia programas de endogamia-hibridación. La metodología de IS, permitió identificar las familias superiores con mejor comportamiento en base al valor más pequeño de IS, que fueron: 69 (14x69), 192 (46x192), 197 (49x197), 188 (45x188) y 154 (34x154), los cuales se encontraron debajo del valor crítico 8.694, lo que nos lleva a seleccionar el 5% superior de la población. **Palabras Claves:** Componentes genéticos, Diseño I, Heredabilidad, Índices de selección.

VII. LITERATURA CITADA

- Agama, A. E., Y. Salinas M., G. Pacheco V., L. A. Bello P. 2011**
Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2:317-329.
- Angeles Arrieta, H. H. 2012.** Mejoramiento genético del maíz en México: el INIA, sus antecesores y un vistazo a su sucesor, el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26(1), 31-48.
- Antonio, M. M., Arellano, J. L., García, G., Miranda, S., Mejía, J. A, y González, F. V. 2004.** Variedades criollas de maíz azul raza chalqueño. Características Agronómicas y Calidad de Semillas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27(1):9-15.
- ASERCA 2010.** Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria
- Barreto, H. J., Bolaños, J. A., Córdova. H. S. 1991.** Índice de Selección; guía para la operación de software. Manual de Capacitación Regional. Programa Regional Centroamérica y el Caribe, Apdo. Postal, Guatemala.
- Betrán F. J., Bockholt, A. J. and Rooney, L. 2001.** Blue corn in: specialty corns. Hallauer, A. R. (Ed). Iowa State University. Ames Iowa, USA. 293-337 pp.

- Caballero, J. G., Pablo, E. J., & Martínez, C. C. 2003.** Estimación por máxima verosimilitud restringida de componentes de varianza y covarianza de múltiples características bajo los diseños I y II de Carolina del Norte. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 26(1): 53-66.
- Cardelas, G. V., Cruz, M. C., Khairallah, M., Srinivasan, G., Jeffers, D., Rivero, S. A., & Brito, D. P. 2001.** Cartografía de QTL de la resistencia a la pudrición de la mazorca (*Fusarium moniliforme*) en maíz de Valles Altos, México. *Agrociencia*. 35(2): 181-196.
- Castañón, G., Cruz, R., Di, Pino. R., Panzo, E., Montiel, M. y Filobello, L. 2000.** Selección de líneas de maíz por resistencia a sequía. *Agronomía Mesoamericana*. 11(001): 163-169.
- Castellanos, J. S. 2000.** Estimación de varianzas genéticas con medios hermanos maternos y diferentes niveles endogámicos y repeticiones. *Agrociencia*. 34(1): 21-32.
- Castillo, F., Herrera, E., Ortega, R., Goodman, M., & Smith, M. E. 2000.** Diversidad genética del maíz y su aprovechamiento *in situ* a nivel regional. Mejoramiento participativo en América Latina y el Caribe.
- Cerón-Rojas, J.J. y J. Sahagún-Castellanos. 2004.** Un índice de selección basado en componentes principales. 39: 667-677
- Chávez A., J.L. 1993.** Mejoramiento de plantas I. 2a edición. Ed. Trillas, México, D.F. 136 p.
- Comstock, R. E. and H. F. Robinson. 1948.** The components of genetic variance in populations. *Biometrics* 4: 254-266.
- Comstock, R. E. and H. F. Robinson. 1952.** Estimation of average dominance of genes. *In*: Heterosis. Gowen, J. H. (Ed.). Iowa State Press. Ames, Iowa. pp: 494-516

- Daros, M., Fei-Xeira, do Amara, L. A., Gonzaga-Pereira, M. and Santona-Santos F. 2004.** Recurrente selection in inbredpopcornfamilies. *Sci. Agric.* 61(6):609-614.
- Durán, D. 2008.** Caracterización fisiológica y molecular de semillas de maíz azul. Tesis de Maestría en Ciencias. UPIBI-IPN. 98 p
- Falconer, D. S. 1984** Introducción a la genética cuantitativa. F. Márquez S. (trad) Editorial CECSA. 14° imp. México. 430 p.
- Fehr, W. R. 1991.** Principles of cultivar development. Volume 1. Theory and technique. Iowa State University Press. Ames, Iowa. 536 p.
- García-Aguirre, G., & Martínez-Flores, R. 2010.** Especies de *Fusarium* en granos de maíz recién cosechado y desgranado en el campo en la región de Ciudad Serdán, Puebla. *Revista Mexicana de Biodiversidad.* 81(1): 15-20.
- Gil-Muñoz, A., López, P. A., Orozco, A. M., & López-Sánchez, H. 2004.** Variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) en el Estado de Puebla, México: diversidad y utilización. *Manejo de la diversidad de los cultivos en los agroecosistemas tradicionales. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Cali, Colombia,* 18-25.
- González Huerta, A., Vázquez García, L. M., Sahagún Castellanos, J., Rodríguez Pérez, J. E., & Pérez López, D. D. J. 2007.** Rendimiento del maíz de temporal y su relación con la pudrición de mazorca. *Agricultura Técnica en México.* 33(1): 33-42.
- Hernández, J.M; Esquivel, G. 2004.** Rendimiento de grano y características agronómicas en germoplasma de maíz de valles altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana.* 27:27-31.

- MasAgro 2012.** Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional 2012. Estrategia internacional para aumentar el rendimiento del maíz
- Márquez S. F. 1968.** Influence of half-sib family size on the estimation of genetic variances in maize. Ph. D. Thesis. Iowa State Univ. Ames. Iowa. 205 p.
- Mendoza, E. M., López, B. A., Oyervides, G. A., Martínez, Z. G., De León C. y Moreno, M. E. 2003.** Herencia genética y citoplásmica de la resistencia a la pudrición de mazorca del maíz (*Zea mays* L.) causada por *Fusarium moniliforme* Sheld. Rev. Mex. Fitopatol. 21(3):267–271.
- Montes V, D., Vergara G. O. & Prieto M. E. 2008.** Determinación de un índice de selección para el peso al nacer y al destete en ganado bovino de la raza Brahman. Revista MVZ Córdoba. 13(2): 1365-1368.
- Pérez, J. E. R. 2008.** Diversidad fenotípica de variedades e híbridos de maíz en el Valle Toluca-Atacomulco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(1): 67-76.
- Restrepo, G. y Pizarro, E. J. 2008.** Índices de Selección y Niveles Independientes de descarte párrafo dos Características Productivas y reproductivas en holstein hato ONU (*Bos taurus*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 21(2): 239-250.
- Robles, S. R. 1986.** Genética elemental y fitomejoramiento práctico. Ed. Limusa, S.A de C.V., México, D.F., 477 p.
- SAGARPA, (2013).** Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Salinas Moreno, Y., Aragón Cuevas, F., Ybarra Moncada, C., Aguilar Villarreal, J., Altunar López, B., & Sosa Montes, E. 2013. Caracterización física y composición química de razas de maíz de grano azul/morado de las regiones tropicales y subtropicales de Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36(1): 23-31.

Salinas–Moreno Y., M. Soto–Hernández, F. Martínez–Bustos, V. A. González–Hernández, R. Ortega–Paczka. 1999. Análisis de antocianinas en maíces de grano azul y rojo provenientes de cuatro razas. *Rev. Fitotec. Mex.* 22:161–174.

Salinas, M. Y. J. Soria R. y E. Espinosa T. 2010. Aprovechamiento y distribución de maíz azul en el Estado de México. *INIFAP. Campo Experimental Valle de México, Chapingo, México. Folleto Técnico.* (42): 50.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2011).

Soares de Lima, J. M., Pravia, M. I., Ravagnolo, O. y Montossi, F. 2011. Índice de selección para la Cría: “Una nueva herramienta disponible en Uruguay para seleccionar reproductores por su mérito económico en la raza Hereford”. Programa Nacional de Carne y Lana, INIA Uruguay.

Vicente, F., Kumar-Vasal, S., McLean, S. D., & Barandiaran, S. K. R. Y. M. 1999. Comportamiento de líneas tropicales precoces de maíz en condiciones de sequía. *Agronomía Trop.* 49, 135-154.

Yáñez, C. L. F., 2005. Índices de selección: sugerencias para su utilización. Universidad Nacional Experimental Sur del Lago. Págs. 107-110.