

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Evaluación y Selección de Híbridos de Maíz Formados a partir de

Dos Metodologías de Predicción

Por:

DIANA LAURA VIZCARRA MANRÍQUEZ

TESIS

Presentada como el requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Mayo 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Evaluación y Selección de Híbridos de Maíz Formados a partir de

Dos Metodologías de Predicción

Por:

DIANA LAURA VIZCARRA MANRÍQUEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



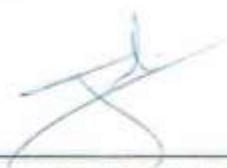
Dr. Antonio Flores Naveda

Asesor Principal



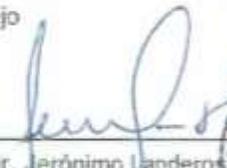
Dr. Neymar Camposeco Montejo

Coasesor



Dr. Josué-Israel García López

Coasesor



Dr. Jerónimo Landeros Flores

*Coordinador Interino de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Mayo 2023

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor principal 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 nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

Autor principal

Diana Lorea Uzciano Hernández
Diana Uzciano H

Nombre y firma

Asesor principal

ANTONIO FLORES NAVEDA
[Firma]

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS**, por permitirme culminar esta gran meta.

Al **INSTITUTO MEXICANO DEL MAIZ “Dr. Mario Castro Gil” (IMM)**, por permitir mi desarrollo profesional encaminado al Fitomejoramiento genético del maíz.

A mi **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)**, por ofrecerme una formación académica de calidad, a través del departamento de Fitomejoramiento.

Al Dr. **Humberto de León Castillo**, por todas las enseñanzas compartidas y la amistad brindada dentro del IMM y por darme la oportunidad de compartir momentos agradables, DEP.

Al MC. **Eduardo Hernández Alonso**, por la oportunidad de integrarme al IMM, por su amistad y por todos los conocimientos compartidos.

A mi comité particular de asesoría por apoyarme en la presentación de este trabajo de investigación.

A todo el personal que labora en el IMM, por su ayuda en las actividades realizadas y por su bonita amistad.

A **Carlitos, Luis Rey, Vicente, Diego, Gerardo y Fernanda**, por su amistad y ayuda en mi estancia en el IMM.

DEDICATORIAS

A mis padres, **Beatriz Manríquez y Ulises Vizcarra**, por su apoyo incondicional y amor, gracias papás por todo lo que me han dado, les debo todo lo que soy, los amo.

A mis hermanos, **Marco Vizcarra, Valeria Vizcarra y Valentina Vizcarra**, que me motivan día a día, son un ejemplo para mí. Gracias hermanos por su cariño y apoyo desde siempre, los amo y admiro.

A mi cuñada, **Carolina Barrón**, por ser como una hermana para mí y por darme la oportunidad de ser tía de Jennifer y Odette, las quiero.

A mis abuelos, **Heriberto Manríquez y María del Carmen Flores**, han sido mis segundos padres y estoy muy agradecida por todo lo que han hecho por mis hermanos y por mí, los amo abuelos.

A mis ángeles en el cielo, hermano **Zahir Vizcarra** y abuelo **Teodoro Vizcarra**, gracias por darme las fuerzas para seguir, estoy segura que ustedes se encuentran en un lugar mejor. Los extraño todos los días.

A **Félix Daniel García**, por ser mi compañero y amigo a lo largo de este tiempo. Estoy agradecida de tenerte en mi vida. Gracias por estar siempre.

A mis amigos de toda la vida **Nitzya, Carmen, Ana Paula, Paulina, José Luis, Paúl y Gilberto** por su amistad todos estos años y su apoyo incondicional, los quiero.

A mis amigos de universidad, **Manuel (Mimi), Mario, Jovani, Rubí, Karen, Daniela y Carolina**, gracias por todas las experiencias, la amistad brindada y el apoyo incondicional, los llevo en mi corazón siempre.

A **Perla Olmos**, por ser una gran amiga y compartir bonitos momentos.

A **Martin Camacho**, gracias por todo el apoyo y la amistad que compartimos.

*“No hay fracaso, salvo en
dejar de intentarlo”*

-Elbert Hubbard

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
DEDICATORIAS.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
RESUMEN.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. El cultivo de maíz.....	4
2.2. Sinaloa y su producción de maíz.....	5
2.3. Rendimiento de los híbridos en Sinaloa.....	6
2.4. Aptitud Combinatoria General (ACG) y Aptitud Combinatoria Específica (ACE).....	7
2.5. Evaluación de ensayos de rendimiento.....	8
2.6. Índices de selección.....	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1. Material genético.....	11
3.2. Descripción de los ambientes y fecha de siembra.....	14
3.3. Descripción de la parcela experimental.....	14
3.4. Labores culturales.....	15
3.5. Preparación del terreno.....	15
3.6. Fertilización.....	15
3.7. Riegos.....	15
3.8. Control de plagas.....	15

3.9. Control de maleza	16
3.10. Variables agronómicas evaluadas	16
3.10.1. Conteo Inicial (CI):.....	16
3.10.3. Floración femenina (FF):	16
3.10.4. Altura de planta (AP):	17
3.10.4. Altura de mazorca (AM):	17
3.10.5. Acame de tallo (AT):.....	17
3.10.6. Acame de raíz (AR):	17
3.10.7. Apariencia general (AG):	17
3.10.8. Humedad (HUM):	17
3.10.9. Rendimiento de Mazorca en t ha⁻¹ al 15.5 % de Humedad (RTO): 18	
3.10.10. Peso de campo:.....	18
3.11. Análisis de varianza para la evaluación de los tres tipos de híbridos 18	
3.12. Gráfico Biplot	19
3.13. Construcción de un índice de selección básico	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Análisis de Varianza	21
4.2. Modelo AMMI.....	27
4.2.1. Visualización del gráfico Biplot.....	27
4.3. Selección de híbridos a través de un índice de selección	29
V. CONCLUSIONES.....	33
BIBLIOGRAFÍA	34

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. proceso utilizado para la predicción de híbridos en función a la acumulación de los efectos favorables de ACG de sus progenitores.	12
Cuadro 3.2. proceso utilizado para la predicción de híbridos en función a la complementariedad del ACG de sus progenitores.	13
Cuadro 3.3. Localidades, ubicación geográfica y fechas de siembra.	14
Cuadro 3.3. Localidades, ubicación geográfica y fechas de siembra.	14
Cuadro 4.1. Cuadrados medios del análisis de varianza de 60 híbridos, evaluados durante el otoño-invierno del 2020-2021, en dos localidades del estado de Sinaloa.....	22
Cuadro 4.2. Análisis de varianza con base a los valores del Índice de Selección formado con floración femenina, rendimiento y apariencia general de 60 híbridos evaluados en dos ambientes del estado de Sinaloa.....	29
Cuadro 4.3. Híbridos seleccionados con base al índice de selección.	30
Cuadro 4.4. Origen y la genealogía de los híbridos que obtuvieron los mejores índices de selección	31

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Gráfico Biplot, para la observación de la correlación existente entre las variables evaluadas.27

RESUMEN

En los programas de mejoramiento genético de plantas, la metodología de predicción del rendimiento en híbridos juega un papel de suma importancia, ya que así se puede conocer las mejores combinaciones de los progenitores para su formación. En el caso del maíz, la predicción precisa del comportamiento de híbridos no evaluados en campo permitirá un mayor progreso genético y menores costos dentro de los programas de mejora genética.

Los objetivos principales de esta investigación fueron identificar los híbridos superiores, los cuales fueron formados a través de dos metodologías de predicción: predicción por medio de valores positivos de ACG y predicción por contraste o complementariedad de ACG, descritas en los trabajos de investigación de los M.C. Carlos Ruíz y Gerardo Garnica. Para la identificación de los materiales superiores, se utilizó un índice de selección básico.

El otro objetivo fue validar estas dos metodologías de predicción basadas en la aptitud combinatoria general de los progenitores, en comparación con el método convencional de formación de híbridos.

Para la investigación, se utilizaron 60 híbridos, los cuales fueron evaluados en dos localidades en el estado de Sinaloa. Se evaluaron nueve variables agronómicas, las cuales el índice de selección agrupó en tres grupos para el estudio de su correlación, arrojando valores de sanidad, precocidad y rendimiento.

Palabras clave: predicción, híbridos, maíz, metodologías.

I. INTRODUCCIÓN

En maíz, uno de los retos actuales del agro-mexicano es el incremento de la producción por unidad de superficie y todo lo que esto conlleva, es decir, involucrar técnicas que permitan maximizar el potencial de rendimiento, se destaca la utilización de maquinaria agrícola, el uso de agroquímicos y la utilización de semilla mejorada adaptada a las diferentes regiones de producción. Esta última, ha permitido tener un beneficio considerable, reflejado principalmente en la media de producción a nivel nacional de este cereal.

La semilla mejorada proviene de la hibridación y es considerada como un método genotécnico que tiene por objeto aprovechar la generación F_1 proveniente de la cruce entre dos poblaciones, las cuales pueden ser líneas endogámicas, variedades de polinización libre, sintéticas o poblaciones F_1 en el caso de cruces dobles. El mejoramiento genético mediante la hibridación involucra la formación y evaluación de un alto número de cruzamientos para determinar las mejores combinaciones entre progenitores; esto implica la necesidad de realizar inversiones en recursos, tiempo y esfuerzo, por lo que es altamente deseable introducir nuevas estrategias para predecir el desempeño de las progenies (Zavala, 2014).

Una de estas técnicas, es la predicción de los híbridos. Este método se basa en la formación y evaluación experimental de una muestra pequeña de cruces y en las coancestrías de los progenitores (líneas), estimadas con base en registros de pedigree o en sus huellas genómicas, esto, es de suma importancia en un programa de mejoramiento genético vegetal (Garnica, 2021).

Lo anterior, debe ser considerado para una evaluación y validado en los ensayos multi-ambientales que juegan un papel muy importante en la selección de rasgos importantes, tales como estabilidad a través de los ambientes, rendimiento de grano

y resistencia a plagas. Las condiciones ambientales modulan la expresión génica causando la interacción genotipo x ambiente (GxA), de la manera de las correlaciones génicas estimadas del rendimiento de líneas individuales a través de ambientes resumen la acción conjunta de los genes y las condiciones ambientales (Acosta- Pech, 2017).

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad realizar una exploración, selección y validación de híbridos simples formados a través de la metodología de formación de híbridos de forma convencional y a través de la ACG de sus parentales.

1.1. Objetivos

- Identificar los híbridos experimentales superiores, con el apoyo de un índice de selección básico.
- Validar la eficiencia de la predicción de híbridos simples formados por la ACG de los parentales.

1.2. Hipótesis

- La diversidad genética que presentan los progenitores que intervienen en las cruzas simples, permitirá la expresión fenotípica diferenciada a partir de las cuales será posible realizar la selección de los híbridos superiores.
- La predicción de cruzas simples entre líneas con buenos efectos de ACG para las variables de interés económico, será una estrategia que permitirá ahorrar tiempo, esfuerzo y trabajo en la obtención de nuevos híbridos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de maíz

México es identificado como centro de origen, diversidad y domesticación del maíz. De las aproximadas 300 razas que existen en América Latina, en México se encuentran entre 59 y 62 razas; las cuales son el resultado de la cuidadosa selección que realizaron poblaciones indígenas durante unos 10,000 años y recientemente, grupos mestizos que las han domesticado adaptándolas a climas, suelos plagas y a diferentes usos (Villatoro, 2020).

Este cereal, tiene la ventaja de que es el único que puede ser usado como alimento en cualquier etapa del desarrollo de la planta. Se encuentra en forma de mazorca y su grano es una cariósida de forma aplastada. El pericarpio constituye alrededor de 5 a 6% del peso total del grano. Su alto contenido en carbohidratos lo hacen el cereal ideal para todos los días (SIAP, 2021).

Este cultivo es uno de los más representativos de México e importante desde el punto de vista social y cultural; es proveedor de aportes energéticos importantes mediante su consumo directo y es materia prima para la industria alimenticia, humana y pecuaria. Hasta hoy, ha sido uno de los grandes logros agronómicos de la humanidad, ya que es el cultivo que más se produce en el mundo.

La producción total de maíz no satisface la demanda interna del país por lo que se importan cerca de 17 millones de toneladas al año; esto ubica a México como uno de los principales productores de maíz en el mundo, detrás de países como Estados Unidos, China, Brasil, Argentina, Ucrania e India (SIAP, 2021).

2.2. Sinaloa y su producción de maíz

México es uno de los principales productores de maíz (*Zea mays* L.) en el mundo, cuya producción en 2021 fue de 27,503,478 toneladas, por encima de otros cereales como el trigo, sorgo, cebada, arroz y avena (SIAP, 2021).

Los cinco estados con mayor producción de maíz son Sinaloa, Jalisco, México, Guanajuato y Michoacán, destacando el estado de Sinaloa con una producción de 5,535,561 toneladas. En 2021, Sinaloa aportó 20% de la producción nacional de maíz en grano. La importancia económica de este estado ha ido en aumento debido a su producción a través del doble ciclo de cultivo (primavera-verano y otoño-invierno) (SIAP, 2021).

El estado de Sinaloa maneja un alto nivel en tecnología de producción, lo cual, aunado con los apoyos a la comercialización y disponibilidad de financiamiento, se traduce en un incremento de producción y rendimientos con la tendencia al alza. La producción de maíz en Sinaloa, es su gran mayoría de grano blanco, la cual es destinada al mercado nacional para el consumo humano (Maceda, 2015).

El crecimiento del volumen de producción de maíz en Sinaloa ha sido muy importante. En el ámbito nacional ha aumentado la producción; sin embargo, en Sinaloa el crecimiento es mucho mayor, especialmente por el corto tiempo en el que ha ocurrido. De aportar sólo el 2 % de la producción de maíz y no figurar entre los estados productores durante la década de los 80, se incrementa la producción de manera tal que actualmente aporta más del 22 %. Es el principal productor de este grano en México. El crecimiento de la producción ha sido mayor que el de la superficie, lo que indica que los rendimientos deben haberse incrementado también de manera importante. Estos aumentaron en promedio un 42 % en el ámbito nacional, mientras que en Sinaloa el incremento fue de 648 %, en promedio (Cruz *et al.*, 2018).

Los principales municipios del estado de Sinaloa, en los que la producción de maíz es de gran aporte al sector agrícola son: Ahome, Guasave, Culiacán, Navolato y

Angostura, los cuales en conjunto generan 80.1% del valor de la producción y 79.9% de las cosechas en la entidad (SIAP, 2021).

2.3. Rendimiento de los híbridos en Sinaloa

El mejoramiento genético y la innovación en semillas han sido factores cruciales en el aumento de la productividad de maíz. En México, la demanda de semillas mejoradas es heterogénea y el resultado de la adopción es incierto. Sinaloa se convirtió de un productor de alta diversificación agrícola al mayor productor nacional de maíz, esto gracias a técnicas de mejoramiento genético implementado al cultivo (Domínguez, 2018).

La hibridación en maíz se conoce como un método de mejoramiento genético que tiene como objetivo principal el aprovechamiento de la generación F₁ (híbrido F₁) proveniente entre el cruzamiento de dos progenitores (P₁ y P₂) con cualquier estructura genotípica, las cuales pueden ser líneas endogámicas, variedades de polinización libre o variedades sintéticas o las poblaciones F₁, mismas en el caso de cruza dobles, así mismo, la obtención de híbridos con alto rendimiento de grano depende de la heterosis que se genera en el cruzamiento de los progenitores (Vargas, 2011).

Maceda, (2016) mencionó que, en el centro del estado de Sinaloa, debido a que el maíz se produce en zonas de riego, principalmente, el 100% de la superficie sembrada en esta modalidad utiliza semilla híbrida de las diferentes compañías presentes en la región como Asgrow, Pioneer, Dekalb, Crisres, Dow AgroSciences, Garst, NK, Techag, Crecer, Unisem, Aspros, Cristiani, Burkard y Con Lee. El rendimiento de un híbrido puede variar, de acuerdo al manejo agronómico que se le proporcione, fecha de siembra, variaciones climáticas y tipo de suelo en que se establezca.

Para la elección de un híbrido de maíz se debe tomar en cuenta, además de su potencial de rendimiento, que tenga un porcentaje de germinación superior a 90% y un vigor superior a 80%. Cabe resaltar que la respuesta productiva de cada híbrido es variable en función de la estructura y la fisiología de la planta, por lo que los

niveles de rendimiento son directamente proporcionales al grado de adaptación de cada material (Montoro, 2018). En 2022 Sinaloa cosechó 9,219 hectáreas, con rendimientos de 11.4 toneladas por hectárea, muy por encima del promedio nacional del avance nacional (3.0 toneladas).

Quimi, (2015) mencionó las principales ventajas de los híbridos en relación con las variedades criollas y las sintéticas: mayor producción de grano; uniformidad en floración, altura de planta y maduración; plantas más cortas pero vigorosas, que resisten el acame y rotura; mayor sanidad de mazorca y grano; en general, mayor precocidad y desarrollo inicial.

2.4. Aptitud Combinatoria General (ACG) y Aptitud Combinatoria Específica (ACE)

Un programa de hibridación efectivo requiere, evaluar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de las líneas parentales; además, evaluar la magnitud de la heterosis de combinaciones híbridas formadas (Tucuch, 2006).

Ruíz, (2019) definió a la ACG como el comportamiento promedio de una línea en combinaciones híbridas y se relaciona con efectos genéticos aditivos; y a la ACE como la acción genética no aditiva (dominancia y epistasis), la cual se utiliza para identificar la combinación de cruzamientos entre líneas endogámicas con rendimiento mejor que el esperado sobre la base del comportamiento promedio de las líneas parentales.

La ACG y la ACE permiten expresar el comportamiento promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, así como designar las combinaciones híbridas que resultan superiores, o no, a las esperadas en relación al promedio de la ACG de las dos líneas progenitoras (Rodríguez *et al.*, 2019).

La ACG proporciona una estimación de los efectos aditivos que contribuyen a la heterosis y la ACE presenta un papel muy importante en la heterosis, por lo que la aptitud combinatoria (AC) se utiliza con éxito para identificar combinaciones superiores (Zhang *et al.*, 2019).

2.5. Evaluación de ensayos de rendimiento

Romo, (2019) mencionó que la última fase de todo programa de mejoramiento genético de maíz, cuando los genotipos con alto potencial de rendimiento de grano y buenas características agronómicas son identificados, es la evaluación de estos mismos en un conjunto de ambientes (localidades y años) en las principales zonas de producción del cultivo. La evaluación de variedades de distintos cultivos es una de las prácticas de investigación más antiguas dentro de las ciencias agrícolas y ha tenido un impacto de suma importancia en la producción de alimentos a nivel mundial. La búsqueda de genotipos con un comportamiento estable a través de los ambientes de cultivo en una región en particular, o de genotipos que destaquen en ambientes específicos, es crítica en el fitomejoramiento.

Esta evaluación de genotipos a través de distintos ambientes, principalmente en ambientes contrastantes, es una de las prácticas más usuales para la recomendación de nuevos materiales a los productores de una región o zona específica, buscando principalmente que estos materiales tengan un nivel de adaptabilidad y estabilidad considerable (Gordón *et al.*, 2006).

Estos mismos autores, Gordón *et al.*, 2006, definieron también la adaptabilidad como la capacidad de los genotipos de aprovechar ventajosamente los estímulos del ambiente, y a la estabilidad como la capacidad de los genotipos de mostrar un comportamiento altamente previsible en función del estímulo ambiental.

A pesar de la gran importancia del estudio de la adaptabilidad y estabilidad de los materiales genéticos evaluados, las recomendaciones de los mejores genotipos a seleccionar se basan en el desempeño promedio de éstos a través de los ambientes, es decir, se basan en la interacción genotipo x ambiente (GxA). Esta Interacción ocurre cuando hay respuestas diferentes de los genotipos en relación con la variación del ambiente (García *et al.*, 2020).

La interacción genotipo x ambiente es un factor determinante del rendimiento, que puede ser aprovechado en mejoramiento genético orientado a la selección de genotipos de alta productividad y adecuada estabilidad ambiental.

Para medir la GxA existen varios procedimientos estadísticos que valoran los genotipos con base a su estabilidad o su baja interacción, donde se establece una relación lineal entre los efectos de GxA y ambientes en base al modelo de regresión lineal o un modelo fenotípico que estime los parámetros de estabilidad mediante regresión e índices ambientales para determinar el comportamiento de genotipos en ambientes contrastantes. De esta manera, el rendimiento es una característica genética que está correlacionada con los estímulos ambientales y se expresa como una GxA positiva o negativa (Zambrano *et al.*, 2017).

2.6. Índices de selección

Para realizar mejoramiento en maíz, actualmente es necesario utilizar alguna metodología que determine los caracteres que deban incluirse en la selección simultánea, esto con el fin de mejorar la producción de grano.

Smith, (1936) fue el primero que sugirió el empleo del concepto de una función discriminante como una forma lógica y sistemática de selección de líneas para mejorar simultáneamente varias características cuantitativas; de esta manera un índice de selección se basa en estimar los valores estandarizados de cada **para** parámetro a los cuales se les resta una meta de selección, que está de acuerdo a la desviación estándar del parámetro y a la media de la población, el resultado es elevado al cuadrado y a la vez es multiplicado por una intensidad cuyo valor depende de la importancia del parámetro en cuestión. Los valores obtenidos por parámetros son sumados y el resultado es el IS. Los genotipos que presenten los IS más bajos se consideran como los mejores.

Romo, (2019) definió un índice de selección como la metodología utilizada para realizar selección de una manera simultánea por varias características, la cual considera además de las cuestiones genéticas, la importancia económica de las características involucradas. El índice se conforma principalmente de dos ecuaciones: una en la cual se incluyen las características que el mejorador desea mejorar, es decir, aquellas que comprenden el objetivo de selección, el cual se denomina genotipo agregado; y otra la cual se constituye de las características sobre las cuales se hace la selección y se denominan criterios de selección.

Por lo general las características utilizadas en un índice de selección deben ser de mayor heredabilidad que el rendimiento *per se* y estar significativamente correlacionadas con este (Rodríguez *et al.*, 2013).

Harris, (1964) indicó que un índice de selección involucra básicamente, la selección indirecta de una variable no observada, por medio de una variable detectable distribuida conjuntamente con la primera.

El índice de Selección (IS), concentra toda la información genética de un reproductor en un solo valor comparativo, seleccionando a la vez varias características y tomando en consideración los aspectos genéticos, dada la importancia económica de cada una de las características involucradas en dicho Índice de Selección. La principal función del IS es ayudar al investigador en la toma de decisiones sobre los genotipos con características superiores o de más interés para el fitomejorador, ganando así, un avance para el siguiente ciclo de selección (Hernández, 2017).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material genético

En el presente trabajo de investigación el material genético utilizado constó de 37 líneas seleccionadas por sus efectos favorables de ACG y su buen comportamiento agronómico para la evaluación de 10 variables agronómicas.

Las líneas son representativas del grupo germoplásmico denominado población normal desarrollado por el Instituto Mexicano del Maíz (IMM). Las características principales del grupo son: grano cristalino, con amplia adaptación al subtrópico mexicano (1000 a 2000 m s.n.m.); de madurez intermedia a tardía.

Con las 37 líneas seleccionadas con efectos favorables de ACG y buen comportamiento agronómico, se generaron 60 híbridos simples, los cuales fueron evaluados en otoño-invierno de 2020 y 2021 en el estado de Sinaloa.

La formación de estos híbridos se realizó atendiendo las indicaciones del trabajo de tesis del M.C. Carlos Miguel Ruíz y el M.C. Gerardo Garnica Chico.

El trabajo del M.C. Garnica se basó en la predicción por la suma o cantidad de los efectos de ACG de cada uno de sus progenitores, es decir, por efectos de aditividad de ACG; por el contrario, el trabajo del M.C. Ruiz utilizó líneas complementarias de ACG para formación de híbridos y de poblaciones de mejoramiento.

El procedimiento de ambos trabajos de investigación fue el siguiente.

Cuadro 3.1. proceso utilizado para la predicción de híbridos en función a la acumulación de los efectos favorables de ACG de sus progenitores.

	REND	FM	FH	CM	PFUS	CP	APTA	AMAZ	MC	AR	AT	PH	HUM	Valor ISE	Media
	(t ha ⁻¹)	(días)	(días)	(1-9)	(%)	(1-9)	(cm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/hl)	(%)		
Líneas	(10)	(9)	(9)	(9)	(8)	(8)	(7)	(7)	(6)	(5)	(5)	(5)	(5)		Del ISE
24	3.60	-5.17	-5.35	0.75	-3.63	0.93	14.65	18.46	-5.04	-1.09	-0.77	-2.69	1.03	45.00	43.00
27	2.08	-3.60	-3.66	0.79	-3.55	1.09	13.03	8.64	-7.57	-0.13	0.04	-1.51	1.56	41.00	
24	3.60	-5.17	-5.35	0.75	-3.63	0.93	14.65	18.46	-5.04	-1.09	-0.77	-2.69	1.03	45.00	43.00
36	2.67	-3.22	-3.19	0.84	-3.36	0.82	2.49	-0.80	-18.79	-0.81	0.15	0.65	1.40	41.00	
24	3.60	-5.17	-5.35	0.75	-3.63	0.93	14.65	18.46	-5.04	-1.09	-0.77	-2.69	1.03	45.00	48.00
47	3.22	-4.66	-4.78	1.01	-2.71	1.44	9.16	1.17	-8.38	-1.33	-0.59	2.72	-0.56	51.00	

FM= Floración Macho; FH= Floración Hembra; APTA= Altura de Planta; AMAZ= Altura de Mazorca; AR= Acame de Raíz; AT= Acame de Tallo; MC= Mala Cobertura; PFUS= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de Planta; CM= Calificación de Mazorca; REND= Rendimiento en mazorca al 15. 5 % de humedad; PH= Peso Hectolítrico; HUM= Humedad; (5 a 10) = Calificación por su importancia económica e ISE = Índice de selección económico.

Cuadro 3.2. proceso utilizado para la predicción de híbridos en función a la complementariedad del ACG de sus progenitores.

	REND	FM	FH	CM	PFUS	CP	APTA	AMAZ	MC	AR	AT	PH	HUM
	(tha ⁻¹)	(días)	(días)	(1-9)	(%)	(1-9)	(cm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	(kg/hl)	(%)
Líneas	(10)	(9)	(9)	(9)	(8)	(8)	(7)	(7)	(6)	(5)	(5)	(5)	(5)
47	3.22	-4.66	-4.78	1.01	-2.71	1.44	9.16	18.46	-8.38	-1.33	-0.59	2.72	-0.56
67	-0.13	-8.35	-8.78	-0.81	10.43	-0.38	-8.78	8.64	19.34	-0.84	-0.77	0.83	-1.64
4	4.23	-0.21	-0.50	0.89	-3.07	0.64	16.87	6.90	-7.07	-0.97	-0.27	0.57	0.11
63	0.11	-6.42	-6.60	-0.50	-5.62	-0.69	-14.85	-24.04	-3.54	-1.09	-0.77	-0.57	-2.20
21	-1.50	-6.67	-7.10	-1.25	-0.38	-0.07	-17.35	-32.29	7.21	-1.09	-0.77	-0.04	-0.92
48	4.29	-2.42	-2.97	1.50	-3.32	0.68	25.34	17.21	-6.91	2.04	0.30	2.75	-0.60

FM= Floración Macho; FH= Floración Hembra; APTA= Altura de Planta; AMAZ= Altura de Mazorca; AR= Acame de Raíz; AT= Acame de Tallo; MC= Mala Cobertura; PFUS= Plantas con *Fusarium*; CP= Calificación de Planta; CM= Calificación de Mazorca; REND= Rendimiento en mazorca al 15. 5 % de humedad; PH= Peso Hectolítrico; HUM= Humedad;

3.2. Descripción de los ambientes y fecha de siembra

Las localidades de evaluación se encuentran ubicadas en los municipios de Angostura y Culiacán respectivamente, en el estado de Sinaloa. Prácticamente la totalidad de la superficie está constituida por una vasta planicie con ligeras ondulaciones, donde sobresalen pequeños cerros aislados y un sistema de lomeríos suaves en la parte sureste.

El clima imperante es semiseco, con lluvias en los meses de julio a septiembre y escasa precipitación durante el resto del año. La temperatura media anual es de 24°C con máxima de 41°C y mínima de 2°C; la precipitación pluvial promedio anual es de 550 milímetros. Los vientos dominantes se desplazan en dirección noroeste a una velocidad aproximada de dos metros por segundo. Estas regiones son susceptibles a perturbaciones tropicales.

La siembra se realizó utilizando una sembradora modificada ALMACO de precisión. Las dos localidades y fechas de siembra se describen en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Localidades, ubicación geográfica y fechas de siembra.

Localidad	Ubicación	Localización geográfica	Fecha de siembra
1	La angostura	25.3532841 – 108.2128784	Martes 15 de diciembre de 2020
2	Chinitos	25.0456258 – 107.9083160	Viernes 11 de diciembre de 2020

3.3. Descripción de la parcela experimental

Los híbridos predichos junto con los obtenidos por el método convencional (incluyendo testigos) se establecieron en experimentos repetidos en surcos de 4 m

de largo, con una distancia entre plantas de 0.11 m y distancia entre surcos de 0.80 m. Se utilizó un diseño de bloques azar con dos repeticiones.

3.4. Labores culturales

Las labores culturales durante el ciclo del cultivo fueron realizadas de forma oportuna y de acuerdo a las necesidades que presentó cada uno de los ambientes o localidades de evaluación, buscando la obtención de los mejores resultados, haciendo énfasis en los momentos oportunos del cultivo.

3.5. Preparación del terreno

Todos los ambientes se prepararon iniciando con un subsuelo y posteriormente se aplicaron dos pasos de rastra.

3.6. Fertilización

La fertilización se realizó con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) con una dosis de 200-100-100; se aplicó todo el fósforo, potasio y la mitad del nitrógeno 20 días después de la siembra durante la etapa fenológica V3; la fertilización se realizó de forma manual empleando Triple 17. La segunda aplicación de nitrógeno se realizó al momento del aporque cuando la planta estaba en V6 y se empleó Urea.

3.7. Riegos

El riego fue rodado; la frecuencia del riego fue definida por las necesidades del cultivo y los intervalos se modificaron de acuerdo a la disponibilidad de agua.

3.8. Control de plagas

Dadas las condiciones atmosféricas cambiantes en los ambientes y el seguimiento del desarrollo del cultivo, el control de plagas tales como el gusano cogollero y el minador se realizó durante las primeras manifestaciones de infestación; los insecticidas empleados fueron PROCLAIM® (Benzoato de Emamectina) y Topgar (Cyromacina).

3.9. Control de maleza

Esta actividad se llevó a cabo durante el ciclo vegetativo del cultivo, dándole más importancia en las primeras etapas del desarrollo y crecimiento de este. El control de la maleza de hoja angosta se realizó con un herbicida: Atraplex (ingrediente activo: Atrazina) en dosis media: 2 kg ha⁻¹ y un post emergente (Convey®).

3.10. Variables agronómicas evaluadas

3.10.1. Conteo Inicial (CI):

Es la cantidad de plantas sanas y vigorosas dentro de cada unidad experimental, este dato se tomó a los 20 días después de la siembra.

3.10.2. Floración masculina (FM):

Son los días transcurridos desde la fecha de siembra hasta que el 50 % de las plantas de la parcela experimental se encuentren en antesis.

3.10.3. Floración femenina (FF):

Son los días transcurridos desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas de la parcela experimental presentan estigmas visibles de 2 cm de longitud en promedio. Las dos variables se midieron con unidades calor (GDU). Para el calcular las unidades calor se utilizó la siguiente fórmula:

$$GDU = \frac{T \max + T \min}{2} - 50$$

Donde:

GDU (GROWTH DEGREE UNITS) = Unidades en grados de crecimiento (unidades calor).

T. MAX. = Temperatura máxima.

T. MIN. = Temperatura mínima.

3.10.4. Altura de planta (AP):

La altura de planta es la longitud del tallo desde la base del suelo hasta la inserción de la hoja bandera. Las unidades que se utilizaron para medir esta variable fueron decímetros.

3.10.4. Altura de mazorca (AM):

La altura de la mazorca se estimó como la longitud del tallo desde el nivel del suelo hasta el nudo de la inserción de la mazorca principal. Al igual que la variable de altura de planta, esta variable se midió en decímetros.

3.10.5. Acame de tallo (AT):

Se consideran como acamadas a aquellas plantas que presentan el tallo parcial o totalmente quebrado por debajo de la mazorca principal. Los resultados para esta variable se reportaron utilizando una escala de 1-9, donde uno eran las plantas con acame y nueve plantas sanas.

3.10.6. Acame de raíz (AR):

Se considera al acame de raíz como aquellas plantas que presentan una inclinación igual o mayor a 30° con respecto a la vertical. Los resultados obtenidos fueron medidos en una escala o score de 1-9, donde uno eran las plantas con acame y nueve plantas sanas.

3.10.7. Apariencia general (AG):

Se determinó con base a los atributos de las plantas de la parcela experimental, es decir, plantas con un buen porte (apariciencia), sanidad, precocidad y potencial de rendimiento; se calificó utilizando una escala de 1 al 9, proporcionándole 9 a los genotipos con plantas muy buenas y 1 a los genotipos que no cumplían con las características mencionadas.

3.10.8. Humedad (HUM):

Es el porcentaje de humedad contenida en el grano al momento de la cosecha. La medida se obtuvo en la cosecha, al momento de trillar o cosechar.

3.10.9. Rendimiento de Mazorca en t ha⁻¹ al 15.5 % de Humedad (RTO):

Es el valor que se obtiene de multiplicar el valor de peso seco por un factor de conversión.

3.10.10. Peso de campo:

Es el peso de las mazorcas cosechadas en cada parcela al momento de la cosecha y está expresado en kilogramos.

Las fórmulas para estimar cada uno se describen a continuación:

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

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

Dónde: %H= Porcentaje de humedad del grano a la cosecha por parcela.

PC= Peso de campo en Kg.

$$FC = \frac{10000}{APU \times 1000 \times .845}$$

Dónde: APU= Área de parcela útil. Es el producto de la distancia entre surcos por la distancia entre plantas por el número exacto de plantas por parcela.

0.845= Constante para transformar el rendimiento de peso seco al 15.5 % de humedad.

1,000= Coeficiente para obtener el rendimiento en t ha⁻¹.

10,000= Valor correspondiente a la superficie de una hectárea en m².

3.11. Análisis de varianza para la evaluación de los tres tipos de híbridos

El análisis estadístico se realizó bajo un modelo de bloques al azar con dos repeticiones, utilizando diez variables. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + R_{j(i)} + T_k + AT_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde: Y_{ijk} = variable observada de la i -ésima localidad, de la j -ésima repetición, del k -ésimo tratamiento; μ = Efecto de la media general; A_i = Efecto de la i -ésima localidad; $R_{j(i)}$ = Efecto de la j -ésima repetición dentro de la i -ésima localidad; T_k = Efecto del k -ésimo tratamiento; AT_{ik} = Efecto de la i -ésima localidad por el k -ésimo tratamiento y ε_{ijk} = Efecto del error.

Para estudiar los efectos de los tres tipos de híbridos, la fuente de variación tratamientos se dividió en híbridos observados (TH1), híbridos predichos (TH2), híbridos predichos o formados por efectos favorables de ACG (TH3) y en dos contrastes: uno TH1 vs (TH2 e TH3) y el otro (TH2 vs TH3).

3.12. Gráfico Biplot

La construcción del índice de selección se basó en un análisis de componentes principales, el cual formó un gráfico Biplot, que agrupó las variables con la finalidad de seleccionar aquellas que representaran mejor la correlación que existe entre estas mismas variables. Para seleccionar las variables se tomó como criterio la longitud del vector y la correlación de las variables en el gráfico, dicho gráfico muestra cuatro grupos que corresponden a los ejes cartesianos. Para la construcción del índice se deben elegir mínimamente tres de estos grupos.

Para la realización de este gráfico fue necesaria la estandarización de los datos debido a la diferencia de unidades, para ello se aplicó la fórmula de Z para estimar los valores:

$$Z = \frac{Y_j - \bar{Y}}{s}$$

Dónde:

Z = Valor estandarizado.

Y_j = valor observado.

\bar{Y} = promedio.

S= desviación estándar de la variable en cuestión.

Una vez estandarizados los valores de las 10 variables evaluadas, se acomodaron en una tabla de contingencia para posteriormente analizarlas en el modelo de interacción multiplicativa y efectos principales aditivos (AMMI: Additive Main effect and Multiplicative Interaction model) y seguido a ello se generó el Biplot en el programa estadístico SAS 9.0.

3.13. Construcción de un índice de selección básico

Para construir el índice de selección primero se realizó un análisis de componentes principales para detectar la correlación existente entre las variables y a partir de estos grupos formados, elegir las variables más adecuadas para construir el IS. Las variables utilizadas para la construcción del índice de selección fueron: rendimiento (RTO), apariencia general (AG) y floración femenina (FF).

Con la ayuda de las tres variables se construyó el índice de selección para ubicar los híbridos superiores en cuanto a precocidad, sanidad y rendimiento, los cuales fueron los tres grupos en que se dividió el grafico Biplot, con respecto a las variables seleccionadas. Los valores de cada variable del híbrido seleccionado se emplearon para estimar el valor al mérito de cada híbrido correspondiente.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de Varianza

En este apartado se presentan los resultados del análisis de varianza (ANVA), los cuales dan cumplimiento a los objetivos e hipótesis planteados. Los resultados se realizaron para variables agronómicas consideradas con mayor relevancia dentro de las localidades de evaluación.

La información recabada provino del comportamiento agronómico de 60 híbridos, los cuales se organizaban en tres tipos. El tipo de híbridos uno fueron los observados, estos híbridos se formaron mediante el método convencional. Magaña (2016) mencionó que este es un método en el cual se aprovecha mejor la acción génica de dominancia sobre dominancia y epistásis que en cualquier otro tipo de mejora hasta la fecha.

El segundo tipo de híbridos fueron los predichos, los cuales se formaron atendiendo el contraste de los valores en la ACG de sus líneas progenitoras. Se eligieron como progenitoras aquellas líneas donde una presentaba efectos favorables de ACG y la otra desfavorables para cada variable, con la finalidad de que al realizar la cruce existiera contrastaste y complementariedad de los valores de ACG entre todas sus variables.

El tercer tipo de híbridos fueron los formados por líneas con ACG positiva (aditividad), es decir, considerando la suma o cantidad de los valores de los efectos favorables de ACG por variable entre dos líneas parentales.

El Cuadro 4.1 presenta los cuadrados medios y las significancias de las diferencias evidentes que se presentaron en los componentes de cada fuente de variación en cada variable evaluada.

Cuadro 4.1. Cuadrados medios del análisis de varianza de 60 híbridos, evaluados durante el otoño-invierno del 2020-2021, en dos localidades del estado de Sinaloa.

FV	GL	CI	FM	FF	AM	AP	AT	AR	AG	HUM	RTO
		#	GDU	GDU	DM	DM	(1-9)	(1-9)	(1-9)	%	t ha⁻¹
LOC	1	380.01**	14477.68**	13235.35 **	33.30 **	67.84**	11.26*	0.93	1.61	246.19**	54.45**
REP(LOC)	2	29.04*	14.06	26.50*	3.17	7.44*	1	2.02	1.21	9.50**	4.61*
HIB	59	22.60**	26.06**	32.22**	5.57**	3.97**	2.69*	3.30**	1.66*	5.57**	7.59**
TH	2	1.94	87.06**	100.55*	1.05	0.52	5.04	5.66*	0.8	11.34*	15.77**
TH1	9	12.21	33.63	35.98	8.33**	5.65*	3.29	4.24	2.27*	11.41**	4.79**
TH2	37	28.03**	21.84**	28.90**	4.79**	3.01**	2.87*	3.52**	1.84*	4.92**	6.05**
TH3	11	16.60*	22.99*	27.86**	6.85*	6.25*	1.17	1.38	0.61	1.94	13.58**
TH1 VS(TH2eTH3)	1	1.48	172.03**	197.48**	0.70	2.93	6.16	3.08	1.38	17.48*	29.28**
TH2 VS TH3	1	3.24	20.84	27.45	0.60	0.23	1.75	10.31*	0.54	10.38	0.02
LOC*HIB	59	10.65	7.68	7.32	0.75	0.9	1.98	0.9	0.73	1.62	2.47* *
ERROR	118	7.76	9.39	8.99	1.18	1.22	1.67	1.1	1.05	0.91	1.15
TOTAL	239										
CV		4.38	1.81	1.75	7.17	4.39	25.69	24.31	22.1	6.14	12.05
MEDIA		53.58	168.68	170.94	15.17	25.17	5.04	5.17	4.64	15.52	8.9
MÍNIMO		52	164.36	166.09	11.62	21.92	3	2.5	3.25	13.6	5.04
MÁXIMO		66.5	173.75	176.05	18.45	25.82	6.75	6.5	6	19.47	11.95
MEDIA TH1		63.7	170.66	172.84	15.27	24.94	4.62	5.02	4.5	16.03	8.09
MEDIA TH2		63.63	168.69	170.76	15.18	25.20	5.17	5.07	4.64	15.55	9.07
MEDIA TH3		63.33	167.94	169.9	15.05	25.28	4.95	5.6	4.77	15.02	9.05

*, **= significancias estadísticas al (P≤0.01) y al (P≤0.05), FV=fuentes de variación, GL=grados de libertad, CI=conteo inicial, FM=floración masculina, FF= floración femenina, AM= altura de mazorca, AP= altura de planta, AT= acame de tallo, AR= acame de raíz, AG= apariencia general, HUM= humedad, RTO= rendimiento, LOC= localidades, REP(LOC)= repeticiones dentro de localidades, HIB= híbridos, TH= tipo de híbrido, TH1= tipo de híbrido uno, TH2= tipo de híbrido dos, TH3= tipo de híbrido tres, TH1 VS(TH2eTH3)= contraste del tipo de híbrido uno con los híbridos dos y tres, TH2 VS TH3= contraste entre los híbridos dos y tres, LOC*HIB= interacción entre las localidades y los híbridos, CV= coeficiente de variación.

La fuente de variación localidades (LOC), presentó diferencias altamente significativas al ($P \leq 0.01$) para la mayoría de las variables, esto debido a factores bióticos o abióticos, en los que destacan el clima, las condiciones edáficas, el manejo agronómico y la incidencia de plagas y/o enfermedades. Para AR y AG no hubo diferencias significativas, lo que indica que la localidad no modifica la expresividad de estas variables. Las diferencias encontradas en localidades permiten hacer una selección adecuada dentro de cada ambiente en específico, lo cual es de suma importancia para un programa de mejoramiento. Montoro, (2018) indicó que, en la búsqueda de genotipos ideales, los programas de fitomejoramiento genético encuentran genotipos que arrojan respuestas diferenciales, genotipos con mejores características en grandes áreas y los que responden de manera favorable en un área determinada distintivos de cada localidad.

Para la fuente de variación de repeticiones dentro de las localidades REP(LOC) se encontraron diferencias altamente significativas al ($P \leq 0.01$) para las variables de AP y HUM y al ($P \leq 0.05$) para las variables CI, FF y RTO. Dichas variables se comportaron de manera diferente en cada repetición dentro de cada uno de las localidades, por lo que se considera que el diseño fue eficaz, ya que permitió observar las diferencias que hubo entre las repeticiones y así minimizar el efecto del error experimental. Para el resto de las variables no hubo diferencias significativas, lo que demostró que estas mantenían la misma expresividad en las repeticiones a través de cada localidad.

Con respecto a la fuente de variación híbridos (HIB) se encontraron diferencias significativas al ($P \leq 0.01$) y al ($P \leq 0.05$) para todas las variables. Esto muestra la gran variabilidad genética de los materiales híbridos evaluados, lo cual es de suma importancia en un programa de fitomejoramiento, ya que nos permitirá hacer una selección más exacta y de acuerdo a los objetivos del programa. Barcelona, (2022) mencionó que lo que aumenta la expresión de ciertos caracteres en un híbrido es el fenómeno llamado heterosis o vigor híbrido, el cual se define como la superioridad del híbrido frente a sus parentales, provocando que se expresen ciertos caracteres.

En la fuente de variación LOC*HIB la cual representa la interacción de las localidades y los híbridos se presentaron diferencias altamente significativas al ($P \leq 0.01$) solo para la variable de rendimiento (RTO), esto significó que hubo una interacción entre el comportamiento de los híbridos con respecto a cada ambiente. Las variables que no presentaron diferencias indicaron que las localidades no afectaban esas características. La interacción Genotipo \times Ambiente (GxA) ocurre cuando los genotipos responden de manera diferente a las variantes de cada ambiente en el cual se están evaluando. El reto de los fitomejoradores es lograr obtener genotipos con características superiores sin que estas se vean afectadas o enmascaradas por la interacción GxA (Lozano *et al.*, 2015).

La fuente de variación tipo de híbrido (TH) mostró diferencias al ($P \leq 0.01$) y al ($P \leq 0.05$) para cinco de las variables (FM, FF, AR, HUM, RTO) lo que implicó una variación entre el desarrollo y rendimiento de los tres tipos de híbridos (observados, predichos por contraste de ACG y predichos por aditividad o efectos favorables de ACG). Esta variación fue producto de factores bióticos y abióticos, además de que cada tipo de híbrido fue formado con progenitores de diferente fondo genético.

Hernández, (2021) mencionó que, para la generación e identificación de los híbridos superiores, los cuales reúnan las características deseables, los programas de mejoramiento genético vegetal, necesitan conocer las relaciones genéticas que existen entre los progenitores, por tal razón es necesario contar con la información de aptitud combinatoria general y específica (ACG y ACE), para una elección eficiente del programa que dará origen a los mejores híbridos. Las variables que no presentaron diferencias indicaron que los híbridos no se veían afectados por estos factores y se mantenían estables en cada localidad.

Con respecto a los tipos de híbridos, cada tipo (TH1, TH2, TH3) mostró diferencias al ($P \leq 0.01$) y al ($P \leq 0.05$) para las diferentes variables debido principalmente a la composición genética de sus parentales. Esto indicó que cada tipo de híbrido se comportó y respondió de manera desigual. Para las variables que no presentaron diferencias se observó que estas se desarrollaron establemente. Quimi-Villanueva, (2015) constató que para que un tipo de híbrido en particular logre la máxima

expresividad de características requeridas, se tiene que realizar una medición del comportamiento del genotipo bajo los diferentes componentes bióticos y abióticos presentes en el ambiente donde se evaluará el genotipo.

Para la fuente de variación que corresponde al primer contraste TH1 vs (TH2eTH3), se encontró significancia al ($P \leq 0.01$) y al ($P \leq 0.05$) para las variables de FM, FF, HUM y RTO, lo cual indica que hay una diferencia en el comportamiento de estos híbridos. Analizando las medias se observó que los híbridos fueron diferentes para la mayoría de las variables. Para la variable FM y FF los híbridos formados por aditividad fueron los más precoces, los híbridos predichos fueron intermedios y los híbridos observados se muestran como los más tardíos. Para la variable de altura de mazorca (AM) los tipos de híbridos 2 y 3 fueron los que obtuvieron un valor más alto, con respecto a esta variable. En cuanto a las variables de acame de raíz y tallo, los híbridos superiores fueron los tipos de híbrido dos y tres, respectivamente. El rendimiento máximo fue de 11.95 t ha^{-1} , siendo los híbridos predichos los más rendidores.

En el caso del contraste numero dos (TH2 vs TH3), solo se observaron diferencias al ($P \leq 0.05$) para la variable de acame de raíz (AR). Esto significó que hubo variación entre los materiales solo para esa variable. Para el resto de las variables no hubo diferencia lo que indicó que los dos tipos de híbridos se mantuvieron estables a través de las localidades. Al hacer una comparación de las medias, se encontró que los valores más favorables los obtuvieron los híbridos predichos, los cuales se sustentan en la teoría de la dominancia propuesta por Devenport. Solís, (2020) mencionó que la teoría de dominancia atribuye la expresión superior de los híbridos a la supresión de alelos recesivos indeseables de uno de los padres por los alelos dominantes del otro; de esta manera los híbridos predichos resultaron ser los materiales más precoces y rendidores.

Al analizar las medias de los tres tipos de híbridos, se encontraron diferencias entre ellos para la mayoría de las variables. En el caso de floración masculina y femenina (FM y FF) los híbridos formados por aditividad fueron los más precoces, con 167 y 169 GDU's respectivamente. Para la variable de AM, los híbridos superiores fueron

los predichos, con 20.14 decímetros. Los híbridos formados por efectos favorables de ACG no tuvieron mucha diferencia con 20.02 decímetros. En las variables de acame de tallo (AT) y acame de raíz (AR) hubo una variación entre los materiales predichos y formados por aditividad, siendo los primeros los más sanos en cuestión de acame de tallo y los segundos los más sanos con respecto a la variable de acame de raíz.

En cuanto a apariencia general (AG) los tres tipos de híbridos no tuvieron mucha variación. En la escala de 1-9 los híbridos observados tuvieron 4.5, los híbridos predichos 4.64 y los híbridos formados por aditividad 4.77. En humedad (HUM) los híbridos formados por aditividad fueron los más precoces con un porcentaje de humedad de 15.02, después le siguieron los híbridos predichos con 15.55 % y al final los híbridos observados con 16.03%.

Con respecto a la variable rendimiento (RTO) los tres tipos de híbridos no mostraron una alta variación, pero si destacaron los híbridos predichos con un rendimiento de 9.07 t ha⁻¹. Los híbridos observados tuvieron un rendimiento de 8.09 t ha⁻¹ y los híbridos formados por aditividad 9.05 t ha⁻¹.

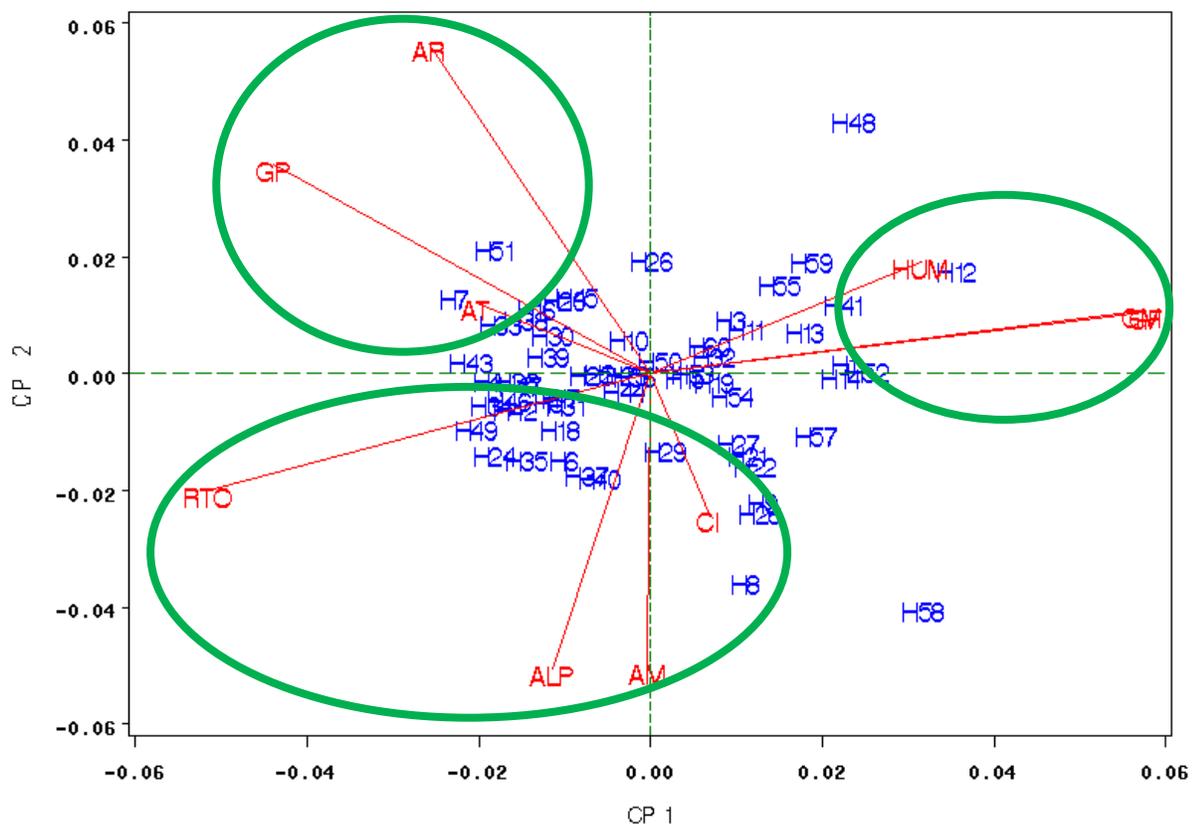
Con estos resultados se comprueba la importancia que juega el ambiente en la expresión del fenotipo cuando se está trabajando con caracteres cuantitativos, de la misma forma, se rectifica la importancia de involucrar más localidades de evaluación para tener más precisión en el conocimiento del potencial genético que se está estudiando.

Debido a las diferencias encontradas se complica hacer selección de los híbridos, dentro de los tres tipos de híbridos y se requiere del auxilio de metodologías para realizar la selección.

4.2. Modelo AMMI

4.2.1. Visualización del gráfico Biplot

El modelo Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativas o AMMI tiene como función mostrar la manera en que se agrupan naturalmente las variables que se van a estudiar, con la finalidad de presentar la correlación que existe entre esas mismas variables. De esta manera se puede tener la certeza que, al seleccionar una variable de un grupo correlacionado, por consiguiente, se seleccionan y mejoran las variables relacionadas.



CI=conteo inicial, FM=floración masculina, FF= floración femenina, AM= altura de mazorca, ALP= altura de planta, AT= acame de tallo, AR= acame de raíz, AG= apariencia general, HUM= humedad, RTO= rendimiento.

Figura 4.1. Gráfico Biplot, para la observación de la correlación existente entre las variables evaluadas.

En el gráfico Biplot se pueden visualizar las variables correlacionadas. En el cuadrante uno se observan las variables de humedad (HUM), floración masculina (FM) y floración femenina (FF). En el segundo cuadrante se observan las variables de apariencia general (GP), acame de raíz (AR) y acame de tallo (AT). En el cuadrante tres se presentan las variables de rendimiento (RTO), altura de mazorca (AM) y altura de planta (AP). Y por último en el cuarto cuadrante se observa la variable de conteo inicial (CI).

En el gráfico se pueden agrupar las variables en tres grupos los cuales corresponden a precocidad, sanidad y rendimiento. Dentro de cada grupo se seleccionó una variable, la cual sirvió para la formación de un índice de selección.

En el primer grupo se seleccionó la variable floración masculina (FM). Esta variable tiene relación con la precocidad de los materiales. Un genotipo precoz presenta muchas ventajas para el agricultor, como la reducción de la exposición del cultivo a factores relacionados con el ambiente, una obtención más rápida de los alimentos, la obtención de dos ciclos por año, entre otras. Tadeo *et al.*, (2015) consideraron que la precocidad es una ventaja importante para lograr la culminación del ciclo y lograr una cosecha aceptable.

En el segundo cuadrante se observó un agrupamiento con las variables apariencia general (AG), acame de raíz (AR) y acame de tallo (AT). Se seleccionó la variable de apariencia general (GP) debido a que esta variable tiene relación con caracteres de sanidad. Valarezo, (2011) mencionó que el cultivo de maíz puede alcanzar una rentabilidad del 68% aplicando las correctas técnicas de fitosanidad.

El tercer grupo constó de las variables de rendimiento (RTO), altura de la mazorca (AM) y altura de planta (AP). La correlación es representada por la variable de RTO, debido a que el principal objetivo del mejorador es la búsqueda de genotipos con un mayor potencial de rendimiento que los materiales existentes en el mercado, logrando con esto el mayor interés del agricultor. Amado, (2018) mencionó que los componentes del rendimiento en maíz son longitud de mazorca, diámetro de mazorca, peso hectolítrico y diámetro del olote, los cuales son de suma importancia para incrementar la producción.

Una vez seleccionadas las tres variables, se procedió a la elaboración de un índice de selección.

4.3. Selección de híbridos a través de un índice de selección

Cuadro 4.2. Análisis de varianza con base a los valores del Índice de Selección formado con floración femenina, rendimiento y apariencia general de 60 híbridos evaluados en dos ambientes del estado de Sinaloa.

FV	GL	SC	CM
LOC	1	10.15	10.15
REP(LOC)	2	25.83	12.91
HIB	59	2001.69	33.92**
LOC*HIB	59	452.66	7.67
ERROR	118	771.73	6.54
TOTAL	239	3262.07	20.58

**= significancia estadística al ($P \leq 0.01$), FV=fuentes de variación, GL=grados de libertad, SC=suma de cuadrados, CM= cuadrados de la media, LOC= localidades, REP(LOC)= repeticiones dentro de localidades, HIB= híbridos, LOC*HIB= interacción de las localidades y los híbridos.

Para las fuentes de variación de LOC, REP(LOC) y para la interacción LOC*HIB no hubo diferencias significativas, lo que indicó que las localidades y las repeticiones se mantuvieron estables, por contrario, la fuente de variación HIB, presentó diferencias significativas al ($P \leq 0.01$), mostrando cada tipo de híbrido, un comportamiento diferente. Dicha variación se atribuye a que en el análisis se consideró tanto a híbridos observados, predichos y formados por aditividad, que de alguna u otra manera tienen efecto en el fenotipo del híbrido, dándole a esto la variación encontrada. Respecto a esto, García *et al.*, (2021) consideran la interacción genotipo-ambiente como un fenómeno universal cuando se prueban diferentes genotipos en ambientes contrastantes.

Para la selección de híbridos sobresalientes, con el propósito de generar nuevos materiales para su futura comercialización se auxilió de la prueba de rango múltiple Tukey realizada con el análisis de varianza del índice de selección. De acuerdo a esto Barreto *et al.*, (1991) mencionaron que el valor del índice representa la suma

de las distancias euclidianas de las variables con respecto a la meta deseada para un genotipo. Aquellos genotipos con el menor valor de índice son los que minimizan dicha distancia y representan aquellos más cercanos a los criterios expresados en la meta para cada variable, por lo tanto, se pueden considerar como superiores.

En el cuadro 4.3 se muestran los híbridos arrojados por el índice de selección, los cuales fueron considerados como los materiales superiores.

Cuadro 4.3. Híbridos seleccionados con base al índice de selección.

HIB	IS	CI	FM	FF	AM	AP	AT	AR	GP	HUM	RTO
		#	GDU	GDU	DM	DM	(1-9)	(1-9)	(1-9)	%	tha ⁻¹
51	6.491	63.75	165.20	167.45	13.58	23.28	5.75	5.50	6.00	17.05	9.85
34	7.408	65.25	167.00	168.80	16.33	26.25	6.25	5.50	5.75	15.96	10.29
7	7.47	62.00	165.20	167.00	14.55	24.00	5.75	5.75	5.75	14.69	9.48
43	7.491	65.50	168.00	168.80	15.05	25.70	6.25	6.25	5.50	14.10	10.52
4	7.942	64.00	165.65	167.90	14.30	25.95	5.75	5.00	5.50	15.00	9.66
42	8.402	63.75	168.35	171.49	15.88	26.00	5.50	5.50	5.50	13.60	10.82

HIB= híbridos, CI=conteo inicial, FM=floración masculina, FF= floración femenina, AM= altura de mazorca, AP= altura de planta, AT= acame de tallo, AR= acame de raíz, AG= apariencia general, HUM= humedad, RTO= rendimiento.

De acuerdo con los resultados obtenidos del índice de selección, se clasificó a los híbridos sobresalientes según su formación de acuerdo a los trabajos de

investigación de los M.C. Carlos Ruíz y Gerardo Garnica, arrojando los datos del cuadro 4.4

Cuadro 4.4. Origen y la genealogía de los híbridos que obtuvieron los mejores índices de selección

HÍBRIDO	ORIGEN	GENEALOGÍA	TIPO DE HÍBRIDO
51	0503*0504	[(M13xC)xC-2-1] x [(E174xE94)xM422xM42-1-B-2]	Observado
34	1019*1020	{(E7-AAAxM29)xM8-2-B} x {(LP7xPN308-1)xM23xC-1-B}	Predicho por aditividad
7	0813*0814	{(M47xLC)x LC-1-B)-1} x {(LP7xPN308-1)xM23xC-1-B}	Predicho por aditividad
43	1101*0907	{LE-7 ^a -A-AxM29)xM8-2B} x {(LP7xPN308-1)xM23xC-1-B}	Predicho por aditividad
4	0807*0808	{(M47xLC)x LC-1-B)-1} x {(M47xV524)xM47-2-B}	Predicho por aditividad
42	1024*0908	{(E7-AAAxM29)xM8-2-B} x {(LPxPN308)xM23-C-2-B}	Predicho por contraste de ACG

El híbrido 43 es una cruce simple con 165 y 167 GDU a floración considerado como una precocidad intermedia con una altura de planta (25.70 DM) y mazorca (15.05 DM) que favorece al momento de la cosecha, ya que si se cosecha de forma manual es mucho más fácil además de que su ciclo es más corto. Presentó una calificación de apariencia general intermedia (5.50), por lo cual el material no tendrá un porte excelente, pero puede ser atractivo para el agricultor por su buen potencial de rendimiento. En cuanto humedad a la cosecha de presentó un 14.10%, resaltando que su rendimiento en mazorca sobre pasa las 10.52 t ha⁻¹.

El híbrido 42 es un híbrido de cruce simple con 168 y 171 GDU a floración considerando como tardío, con una altura de planta (26.00 DM) y mazorca (15.88 DM) que puede ser utilizado para doble propósito tanto para producción de grano por su gran rendimiento como para forraje, ya que se puede aprovechar para la producción de forraje para el ganado bovino. Presentó una calificación en apariencia general de 5.50 por lo cual el material no tiene un porte ideal y atractivo, pero si cuenta con un gran potencial de rendimiento de 10.82 t ha⁻¹. En humedad a la cosecha obtuvo un 13.60 %.

Estos híbridos fueron los que presentaron los mayores rendimientos, siguiéndoles el híbrido 34, el cual tuvo un rendimiento de 10.52 t ha⁻¹. Tuvo una floración de 167 y 168 GDU, considerado como tardío, una altura de planta de 26.25 DM y de mazorca de 16.33 DM, estas características lo hacen ideal para la producción de forraje. En cuanto a apariencia general, el material no mostró un porte excelente pero debido a su potencial de rendimiento pudiera ser considerado como atractivo para el productor.

El híbrido 51 fue el que obtuvo mayor calificación en apariencia general (6.00), con una precocidad intermedia de 165 y 167 GDU, una altura de planta de 23.28 DM y de mazorca de 13.58 DM. Al momento de la cosecha obtuvo un 17 % de humedad, lo cual lo hace un material tardío. A pesar de su buen porte general, el material presentó un potencial de rendimiento de 9.85 t ha⁻¹, lo cual podría ser poco atractivo para el mercado.

V. CONCLUSIONES

El apoyo de la metodología del índice de selección, fue eficiente, debido a que se lograron identificar híbridos simples con atributos sobresalientes. Además, permitió hacer una identificación y selección de aquellos materiales superiores que presentaron efectos favorables para las características de rendimiento, sanidad y precocidad. Los híbridos, arrojados por el índice de selección, que resultaron superiores fueron los híbridos 51, 34, 7, 43, 4 y 42, siendo solo el 51 un híbrido formado por el método convencional y los restantes híbridos predichos.

En cuanto a la evaluación de las dos metodologías para la predicción de híbridos (híbridos formados por método convencional e híbridos predichos por ACG), los híbridos predichos resultaron superiores a los híbridos formados por el método convencional, específicamente los híbridos 34, 43 y 42, los cuales obtuvieron un rendimiento de 10.29 t ha^{-1} , 10.52 t ha^{-1} y 10.82 t ha^{-1} respectivamente. Esto indica que las metodologías de predicción son una manera efectiva de obtener híbridos con características superiores y de buen comportamiento agronómico ahorrando tiempo y recursos.

En relación a los métodos de predicción, que fueron predicción en base a la complementariedad de ACG y predicción por efectos positivos de ACG, las dos metodologías resultaron estadísticamente similares entre sí.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Pech, R. G. (2017). Modelos de selección genómica para predicción de caracteres complejos en híbridos de maíz. Tesis de doctorado. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. De México. 125 p.

Amado Amador, B. (2018). Estimación de heredabilidad en componentes de rendimiento para un grupo de maíz enano. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 55 p.

Barcelona, J. (2022). Estudio de la variabilidad genética en razas nativas de maíz (*Zea mays* L.) y su potencial para el mejoramiento del cultivo. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. 43 p.

Barreto, H. J., Bolaños, J. A. y Córdova, H. S. (1991). Programa Índices de Selección. Guía para la operación del Software. CIMMYT. México, D. F. 27 p.

Cruz, D. *et al* (2019). La Producción de Maíz en Sinaloa, México, y sus Implicaciones para el Medio Ambiente. Letras Verdes. *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (25), 100-118.

Domínguez Mercado, C. A. (2018). Calidad industrial y rentabilidad de ocho híbridos de maíz blanco en Guasave, Sinaloa. Tesis de doctor en ciencias. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo de México. 122 p.

García-Mendoza, P. J., Pérez-Almeida, I. B., Prieto-Rosales, G. P., Medina-Castro, D. E., Sánchez, D. M., Marín-Rodríguez, C. A., ... & Medina-Hoyos, A. E. (2021). Interacción genotipo ambiente y potencial productivo de 25 variedades de maíz amiláceo en la provincia de Tayacaja, Perú. *Bioagro*, 33(2), 67-78.

Garnica Chico, G. (2021). Predicción de híbridos de maíz simples a partir de la ACG de sus parentales. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 63 p.

Gordón-Mendoza, R., Camargo-Buitrago, I., Franco-Barrera, J., & Saavedra, A. G. (2006). Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 189-199.

Hernández Alonso, E. (2017). Formación de una población de maíz enano adaptada al bajío mexicano, a partir de líneas con favorables efectos de aptitud combinatoria y buen desempeño agronómico. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 113 p.

Hernández Martínez, R. (2021). Evaluación de la eficiencia de marcadores moleculares para la formación de híbridos en maíz. Tesis de doctor en ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 74 p.

Joaquín, U. T., Hérllyn, A. C., Jaime, V. A., Jaime, M. C., Jesús, P. M., Alberto, B. G., ... & Daniel, G. G. (2011). Recomendaciones para el Cultivo de Maíz Durante el Ciclo Otoño-invierno en el Estado de Sinaloa. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Culiacán, Sinaloa. 44 p.

Lozano-Ramírez, Á., Santacruz-Varela, A., San-Vicente-García, F., Crossa, J., Burgueño, J., & Molina-Galán, J. D. (2015). Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista fitotecnia mexicana*, 38(4), 337-347.

Maceda Sánchez, I. (2015). Factores asociados en la producción de maíz (*zea mays* L.) en Culiacán, Sinaloa. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, coah. 113 p.

Magaña Mendoza, A. K. (2016). Formación de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) precoces con líneas dobles haploides por normales evaluadas en tres localidades del estado de Jalisco. Tesis de maestro en ciencias. Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco. 45 p.

Montoro, A. E. (2018). Selección de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a partir de ensayos multiambientales. In: métodos cuantitativos para la investigación agropecuaria. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, España. Pp: 1-14.

Quimi Villanueva, D. (2015). Interacción genotipo-ambiente de híbridos triples experimentales de maíz (*zea mays* L.) en dos zonas del Litoral ecuatoriano. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. 73 p.

Rodríguez, P.G., Zavala, G. F., Gutiérrez, D. A., Treviño, R. J. E., Ojeda, Z. C. y De la Rosa, L. A. (2013). Comparaciones de dos Tipos de Selección en Poblaciones de Maíces Criollos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4): 569-583.

Rodríguez-Pérez, G., Zavala-García, F., Treviño-Ramírez, J. E., Ojeda-Zacarías, C., Mendoza-Elos, M., Cervantes-Ortiz, F. y Torres Flores, J. L. (2019). Estimación de componentes genéticos en líneas endogámicas de maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia*, 53(2), 245-258.

Romo Castro, O. (2019). Índice de selección básico como criterio principal en la elección de híbridos simples de maíz. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 73 p.

Ruiz González, C. M. (2019). Selección de híbridos simples e identificación de líneas parentales de maíz genéticamente superiores, con base en índices de selección. Tesis en maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 67 p.

SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [fecha de consulta: 04 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.

SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Panorama agroalimentario 2021. [fecha de consulta: 03 de marzo de 2023]. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2021/Panorama-Agroalimentario-2021.

Solís Caicedo, R. B. (2020). Análisis e interpretación de la importancia de la heterosis en especies vegetales. Tesis licenciatura. Universidad Técnica de Babahoyo. Babahoyo, Los ríos, Ecuador. 30 p.

Suarez Alva, R. (2022). Selección de híbridos de maíz utilizando la metodología de índice de selección. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 64 p.

Tucuch Cauich, C. A. (2006). Índices de selección para producción y calidad forrajera en maíz QPM. Tesis de doctor en ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, coah. 100 p.

Valarezo-Beltron, O., Muñoz, X., & Bernardo, E. (2011). Evaluación de tecnologías para el manejo fitosanitario del cultivo de maíz en la Provincia de Manabí. *La Técnica*, (4), 60-64.

Vargas Carranza, R. V. (2015). Densidad de población en hembras de maíz para la producción y calidad de semilla en Sayula, Jalisco. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 75 p.

Villatoro Ventura, A. (2020). Efecto del maíz genéticamente modificado sobre la diversidad y abundancia de enemigos naturales no blancos. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 61 p.

Zambrano, E. E. Z., Limongi, J. R. F. R. F., Cobeña, F. D. A., Linzan, J. P. V., Villafuerte, M. B. C., Moreno, J. F. E., & Mendoza, J. L. Z. (2017). Interacción genotipo ambiente de híbridos de maíz bajo temporal en Manabí y Los Ríos, Ecuador. *Revista ESPAMCIENCIA* ISSN 1390-8103, 8(1), 7-14.

Zavala Pliego, C. (2014). Predicción del rendimiento y comportamiento agronómico de cruas simples de maíz con auxilio en marcadores moleculares. Tesis de maestro en ciencias, Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo de México. 61 p.

Zhang, Z., Jin, Y., Chen, B. y Brown, P. (2019). Predicción del rendimiento de la almendra de California a nivel de huerto con un enfoque de aprendizaje automático. *Frontiers in Plant Science*, 10, 809.