

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Análisis de Estabilidad y Comportamiento Agronómico de Híbridos Simples de Maíz Evaluados en el Estado de Guanajuato, México

Por:

LUIS REY FLORES MATA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Análisis de Estabilidad y Comportamiento Agronómico de Híbridos Simples de
Maíz Evaluados en el Estado de Guanajuato, México

Por:

LUIS REY FLORES MATA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



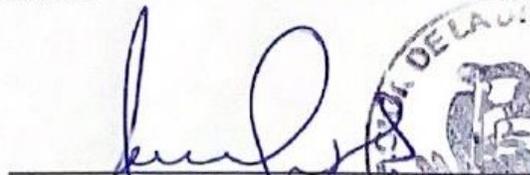
M.C. Eduardo Hernández Alonso
Asesor Principal



Ing. Raúl Gándara Huitrón
Coasesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Coasesor



Dr. Jerónimo Landeros Flores
Coordinador Interino de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Marzo, 2023

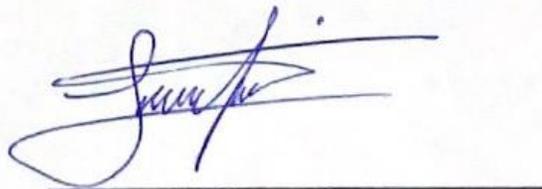
DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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, gráficas, 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 el titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Pasante



C. Luis Rey Flores Mata

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero dar gracias a **Dios** por haberme dado salud, fe, sabiduría y fuerzas para poder cumplir con esta meta; por bendecirme y guiarme siempre por el camino del bien, ayudándome a ser una mejor persona día con día.

A mi **Alma Terra Mater**, por abrirme las puertas de esta gran casa de estudios, a quien le debo todos mis conocimientos adquiridos y, sobre todo por haberme formado profesionalmente.

Al **M.C. Eduardo Hernández Alonso** por su amistad invaluable, por haberme brindarme todo su apoyo y confianza al permitirme realizar este proyecto con base en todos sus conocimientos y experiencia y por los grandes consejos compartidos.

A mis asesores: **Ing. Raúl Gándara Huitrón** y al **Dr. Antonio Flores Naveda** por la valiosa experiencia que aportaron a la investigación, sus valiosas sugerencias, la confianza y su tiempo invertido y por estar en la mejor disposición de participar como jurado examinador de este trabajo de tesis.

A mis padres: **Rocio Isela Mata Dávalos** y **Efrén Flores Rodríguez (†)** quienes siempre estuvieron ahí brindándome todo su amor, su apoyo incondicional, económico y emocional, y por siempre creer en mí. Los amaré siempre.

A mis hermanos: **Juan Efrén Flores Mata** y **Rocio Flores Mata** que, junto a mis padres, siempre han sido mi motor y son mi mayor motivación para poder seguir adelante.

A mi novia **Alissa Celic Limón Bernal** por todo el cariño, amor y apoyo incondicional, así como todo aquello bonito que he aprendido a tu lado. Hiciste que a tu lado el tiempo fuera más ameno. Por un logro de muchos que vendrán más adelante. Gracias por siempre motivarme cuando lo necesité. Te adoro mucho.

A todos los del **Instituto Mexicano del Maíz: Carlos, Vicente, Diego, Diana, Miguel, Andrés, Poncho, Luis, Leonel, Jaime, Don Max, Robert**, etc. Gracias por sus consejos y por cada momento compartido juntos.

DEDICATORIA

A mi madre: **Rocio Isela Mata Dávalos** por siempre estar ahí cuando más lo he necesitado, por ser esa fortaleza que he necesitado siempre para poder crecer personal y profesionalmente. Este logro no solo es mío, también es tuyo. Te amo.

A mi padre: **Efrén Flores Rodríguez (†)** que, aunque ya no estás aquí, siempre fuiste un pilar para mí y para la familia. Todo se lo debo a ustedes. Te amaré por siempre mi General.

A mis hermanos: **Rocio Flores Mata** y **Juan Efrén Flores Mata** por siempre motivarme para ser alguien mejor, son mi inspiración. Los amo. Este logro es suyo.

A mis padrinos: **Francisco Pérez Flores** y **Gloria Elizabeth Preciado Ornelas**, por brindarme todo su amor y su apoyo incondicional siempre que lo he necesitado, por siempre darme esa motivación cuando la he necesitado. Los quiero mucho. También a **Glori, Letsie, Gelacio, Blanca, Silvia, José y Josué**.

Al **Dr. Humberto de León Castillo (†)** por brindarme su amistad, confianza, consejos y toda su experiencia para poder realizar este proyecto de tesis.

A mis mejores amigos: **Carlos Carmona, Vicente Zarzoza y Diego Vargas**, y al **M.C. Eduardo H.** por siempre apoyarme, escucharme, aconsejarme, regañarme, pero, sobre todo, por siempre estar ahí cuando más lo he necesitado. La vida nos hizo amigos, pero la universidad nos hizo hermanos. LCVDE.

A mi novia **Alissa Celic Limón Bernal** por siempre estar en las buenas y cuando más lo he necesitado. Por apoyarme y por creer en mí siempre. Te amo corazón.

A mis tías: Teresita Mata, Jenny Mata por su amor y todo su apoyo. A mis primos Roberto, Marisol, Irandeny, Rafael. A mis abuelos Juan M, Teresa D., Ma Luz R.

A mis amigos de la UAAAN: Andrés, Lizbeth A., Francisco, Víctor, Paulina, Manuel, Poncho, Luis, Leonel, Miguel, etc por siempre estar en el proceso en cada momento.

A mis amigos de Doblado: Emmanuel (Chuyito), Félix, Buggi, Melani, Daniel, Ángela, Alejandro, Urzula, Carlos, Pablo, etc. Los quiero. Gracias por todo su apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
Objetivos.....	3
Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
Hibridación.....	4
Heterosis.....	5
Interacción Genotipo Ambiente (IGA).....	6
Estabilidad.....	6
Índices De Selección.....	7
III. MATERIALES Y MÉTODOS	8
Material Genético.....	8
Ubicación Del Sitio Experimental.....	8
Diseño Experimental.....	10
Siembra.....	10
Fertilización.....	10
Riegos.....	10
Labores Culturales.....	11
Control De Malezas.....	11
Control De Plagas.....	11
Variables Agronómicas Estudiadas.....	11
Humedad De Grano (%H).....	11
Peso De Campo (PC).....	11

Rendimiento (REND):.....	12
Análisis Estadísticos De Los Datos Agronómicos.....	12
Análisis De Varianza Combinado.....	12
Gráfico Biplot Del Modelo AMMI.....	13
Índice De Selección (IS).....	14
Criterios De Selección.....	15
IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	16
Análisis de Varianza General	16
Prueba de Rango Múltiple a través de Localidades	19
Análisis De Estabilidad Mediante El Modelo AMMI 1 Para Rendimiento.	22
Análisis de Estabilidad Mediante el Modelo AMMI 2.....	25
Análisis De Varianza Del Índice De Selección	27
Selección de Híbridos Superiores con Base en el Índice de Selección	29
V. CONCLUSIONES	32
VI. LITERATURA CITADA.....	33

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
3.1	Localización geográfica y condiciones agroecológicas de los ambientes de evaluación utilizadas en este proyecto de investigación.....	9
3.2	Condiciones climáticas de los ambientes de evaluación utilizadas en el proyecto de investigación.....	9
3.3	Descripción de las fechas de siembra y condiciones de temperatura promedio en cada ambiente.....	10
4.1	Análisis de varianza de 60 híbridos simples, evaluados en 3 localidades del estado de Guanajuato durante el ciclo P-V 2021.....	18
4.2	Agrupamiento estadístico de 3 localidades con base en las variables de rendimiento y humedad.....	19
4.3	Media general de rendimiento y humedad a través de 3 localidades de los mejores 15 híbridos evaluados durante el ciclo P-V 2021, con base en la prueba de Duncan.....	21
4.4	Análisis de varianza de los valores del índice de selección de 60 híbridos de cruza simples de maíz (48 experimentales y 12 testigos comerciales) evaluados en 3 localidades del estado de Guanajuato en el 2021.....	28
4.5	Híbridos de maíz seleccionados mediante un índice de selección básico.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
4.1	Biplot del AMMI 1 que muestra la respuesta a la interacción de 60 cruzas simples de maíz evaluados a través de 3 ambientes del Bajío mexicano en el ciclo P-V 2021.....	24
4.2	Biplot del AMMI 2 para el promedio de rendimiento de las cruzas simples de porte normal evaluado en tres ambientes del Bajío mexicano.....	26
4.3	Zoom del AMMI Biplot de la Figura 4.2 para el promedio de rendimiento de las cruzas simples de porte normal evaluado en tres ambientes del Bajío mexicano.	27

RESUMEN

En este estudio se evaluaron 60 híbridos simples de maíz en el ciclo PV-2021 en 3 localidades del Estado de Guanajuato, de los cuales 48 de ellos fueron cruza simples, pertenecientes al programa de mejoramiento del “El Bajío” del Instituto Mexicano del Maíz de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y 12 híbridos que fueron utilizados como testigos de las empresas Asgrow, Dekalb y Pioneer. La presente investigación fue realizada bajo los siguientes objetivos: i) explorar la interacción de cruza simples de maíz para observar su estabilidad en la región del subtrópico mexicano; ii) identificar cruza simples de comportamiento agronómico superior, apoyados por un índice de selección básico. Las variables evaluadas en el trabajo fueron: Rendimiento ($t\ ha^{-1}$) y Humedad (%). El diseño experimental utilizado fue un diseño de bloques al azar con arreglo alfa látice con dos repeticiones por localidad. Cada unidad experimental consistió en dos surcos de 4 m cada uno, en el cual se sembraron 35 semillas por surco, espaciadas a 11.3 cm entre planta y planta. La distancia entre surcos fue de 0.8 m, dando una densidad total de 110,000 plantas por hectárea. Los resultados del análisis de varianza combinado mostraron diferencias ($P \leq 0.01$) para las localidades, para híbridos y para híbridos por localidad en las dos variables. El procedimiento para identificar a los híbridos más estables a través de las localidades fue con apoyo del modelo AMMI, el cual demostró que el híbrido más estable y rendidor fue el 29 (DK2069) y la localidad que obtuvo el mejor comportamiento con base en la media de rendimiento fue Charco de Pantoja. Para la identificación y selección de híbridos con comportamiento agronómico superior se auxilió de la metodología de índice de selección básico, encontrando que el mejor híbrido fue el 1 (DK2069), 29 (DK2069), 50 (1021*1022) y 39 (1024*0908), sin embargo, el híbrido con mayor precocidad fue el 55 (1101*0907).

Palabras clave: AMMI, rendimiento, índices de selección.

I. INTRODUCCIÓN

Para poder solventar las necesidades de cereales básicos que tiene nuestro país y seguir incrementando los rendimientos, se tienen que auxiliar de diversas tecnologías e innovaciones agrícolas. Una de ellas es a través del mejoramiento genético, el cual, ha logrado incrementar la cantidad de toneladas cosechadas por hectárea y de esta forma seguir sustentando y aportando en el agro mexicano.

El maíz es el cereal primordial en la dieta de los mexicanos, nuestra población consume anualmente un promedio de 335.8 kg *per cápita*. Nuestro país, en la actualidad sufre de insuficiencia de este grano, produciendo 27,228,242 toneladas, por lo que tiene que recurrir a adquirir cantidades significativas de grano del exterior, principalmente de Estados Unidos, lo que lo hace ser el mayor importador de maíz grano en la actualidad (SIAP, 2020).

Aunque México no es un país autosuficiente en maíz, es partícipe importante en la producción internacional de grano ocupando el 8° lugar, exportando principalmente a países como Venezuela, Colombia, Costa Rica, etc. Es común que en todo el territorio mexicano se cultive maíz, pero son solo algunos estados los que concentran el mayor porcentaje de producción a nivel nacional como lo son Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Estado de México y Guanajuato, quienes aportan el 57.9% de la producción total. Actualmente, en Guanajuato se tiene una producción nacional de 1,722,978 toneladas, lo que equivale al 6.3% de la producción total de maíz del país (SIAP, 2020).

El mejoramiento genético del maíz es una herramienta que permite la formación de híbridos y variedades para uso comercial. En el mejoramiento moderno de plantas es de suma importancia conocer relativamente al componente genético de los materiales usados como progenitores en un programa de hibridación, puesto

que ya se sabe que hay progenitores que pueden combinar bien para poder formar progenies híbridas que sean altamente productivas (Gutiérrez *et al.*, 2004).

Los programas de mejoramiento de maíz tienen como objetivo crear híbridos cada vez más productivos, que requieren la realización de varias cruzas y la generación de varios híbridos para ser probados en cruzas de prueba (Wagner, 2014).

La interacción genotipo-ambiente también merece gran importancia en la evaluación de genotipos desarrollados para diferentes condiciones de producción. Además, cuando los materiales son sembrados en distintos ambientes, su rendimiento varía, lo cual se define como interacción genotipo por ambiente o estabilidad fenotípica (Becker, 1981 citado por Rodríguez *et al.*, 2011; Vera *et al.*, 2013).

Es posible crear miles de posibles combinaciones de cruzas, pero desafortunadamente, solo una pequeña parte de estas combinaciones serán posibles de evaluar en el campo debido a que el presupuesto es muy limitado. Tomando en cuenta los fundamentos citados anteriormente, se realizó el presente trabajo de investigación, en el cual las cruzas simples serán sometidas a una evaluación en diferentes condiciones ambientales en distintas zonas de producción del bajío mexicano, con la finalidad de detectar la presencia de la adaptabilidad y la estabilidad y seleccionar los de mejor comportamiento agronómico y con la posibilidad de que estos puedan ser utilizados como híbridos comerciales.

Objetivos

- Explorar la interacción de cruzas simples de maíz para observar su estabilidad en la región del subtrópico mexicano.
- Identificar cruzas simples de comportamiento agronómico superior, apoyados por un índice de selección básico.

Hipótesis

- La estabilidad presente en los híbridos evaluados a través de los diferentes ambientes proporcionara información útil para la selección adecuada y que más convenga al programa de mejoramiento del Instituto Mexicano del Maíz.
- El análisis combinado permitirá detectar variabilidad entre los híbridos evaluados, además de, seleccionar aquellos con alto potencial productivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Hibridación

El mejoramiento híbrido es un enfoque talentoso para mejorar la productividad de los cultivos y la estabilidad del rendimiento. El desarrollo de los híbridos involucra la selección de los padres consanguíneos con los atributos deseados y con buena habilidad combinatoria (Nyaga *et al.*, 2020).

En todo programa de mejoramiento genético, la elección de germoplasma es una de las decisiones más importantes que el mejorador debe tomar, ya que puede ser determinante en el éxito del programa. El mejoramiento del maíz incluye dos componentes de igual importancia: la elección del germoplasma y el desarrollo de líneas para su uso en híbridos (Guillen *et al.*, 2009).

El mejoramiento genético del maíz es un proceso continuo para la formación de híbridos y variedades. Al mejorar un cultivo, es importante conocer el componente genético de los materiales usados como progenitores (De la Cruz *et al.*, 2010).

López *et al.* (2022) citando a Márquez-Sánchez (2009), explica que, para incrementar los rendimientos de este cultivo, un sistema de mejoramiento ampliamente usado es la hibridación, con ello los híbridos han contribuido al aumento significativo de la producción. La estructura genética que impera en éstos es el uso de tres líneas para formar los llamados híbridos triples, también se han usado híbridos dobles y de cruce simple.

Escorcía *et al.* (2010), expone que un propósito importante del mejoramiento genético de maíz por hibridación es generar cruces que superen en rendimiento de grano a las variedades locales criollas y mejoradas. En la producción comercial de maíz se usan tres tipos de híbridos: cruce simple, cruce triple y cruce doble.

Canales *et al.* (2016), cita a Crossa *et al.* (2006), explicando que, en los programas de mejoramiento genético, es importante definir cuáles son los genotipos sobresalientes en cuanto a rendimiento, adaptación y estabilidad, evaluando estas propiedades en multi-ambientes para recomendar su uso de manera comercial.

Heterosis

Según Ramírez *et al.* (2007), la heterosis es un fenómeno que se presenta en la mayoría de las especies alógamas como el maíz, donde los híbridos superan a sus progenitores en uno o más caracteres entre los que sobresale el rendimiento de grano. Por tanto, los métodos de mejoramiento genético para la formación de híbridos tienen como objeto final capitalizar al máximo la heterosis entre los progenitores seleccionados.

La heterosis o como también se le conoce vigor híbrido, es la base del mejoramiento genético por hibridación (Escorcía, *et al.*, 2010).

Falconer y Mackay (1996) citado por Guzmán *et al.* (2017), mencionan que la heterosis puede ser definida como la diferencia entre el desempeño de un híbrido con respecto a la media de sus padres.

La heterosis es uno de los fenómenos biológicos que más interés ha despertado en la investigación debido a su importancia en el mejoramiento de las plantas. Es el resultado del cruzamiento de progenitores no emparentados que da oportunidad de obtener híbridos superiores a sus progenitores (Esquivel *et al.*, 2011).

Esquivel *et al.* (2011), citando a Moll *et al.* (1965) señala que en las cruzas intervarietales, en la medida que la divergencia genética entre los progenitores es mayor, también lo es la heterosis de la cruce; sin embargo, existe un grado óptimo de divergencia genética donde la heterosis puede ser máxima, puesto que cuando la divergencia genética es extremadamente grande la heterosis se puede reducir.

La heterosis, fenómeno que ocurre cuando el híbrido supera a sus progenitores en características fenológicas de crecimiento y rendimiento, resulta de la interacción de varios factores independientes aportados por los progenitores que participan en la formación de dicho híbrido (Gaytán y Mayek, 2010).

Interacción Genotipo Ambiente (IGA)

El comportamiento diferencial de los genotipos en las diversas localidades se debe a la interacción genotipo por ambiente (IGA). La ocurrencia de dicha interacción tiene gran importancia, puesto que la mayoría de las veces hace que los mejores genotipos en una determinada localidad no lo sean en otra, dificultando la recomendación de híbridos para toda la población. Una forma de sacar provecho de la IGA para la indicación de nuevos híbridos es identificar genotipos con alta adaptabilidad y estabilidad fenotípica (Silva *et al.*, 2014).

La estabilidad fenotípica del rendimiento ha tenido varias interpretaciones, siendo dos de ellas la biológica y la agronómica. La biológica es cuando el genotipo presenta mínima variación a través de los ambientes, mostrando un rendimiento constante en cualquier condición de producción. La agronómica es cuando existe una mínima interacción genotipo por ambiente, lo cual está asociado a la pretensión de obtener un incremento del rendimiento en respuestas para su evaluación, con una amplia variedad de condiciones para la obtención de genotipos estables (Rodríguez *et al.* 2011).

Estabilidad

Montoro (2018), citando a Gabriel (1971), explica que los modelos de efectos aditivos e interacción multiplicativa, o AMMI, fueron los primeros modelos lineales-bilineales usados en redes de ensayos agrícolas multiambientales con el objetivo de estudiar la interacción GxA mediante un análisis de componentes principales de una matriz de dos vías con los efectos de interacción. Las componentes principales obtenidas pueden visualizarse mediante gráficos Biplot. Estos consisten en un diagrama de dispersión de dos componentes principales, graficando los autovectores ambientales como flechas que salen del origen de estas componentes.

Según Vargas *et al.* (2016), el modelo estadístico AMMI presenta el mejor ajuste en el análisis de comportamiento de los genotipos evaluados a través de ambientes, ya que permite hacer una clasificación por ambientes e identificar los genotipos de mejor comportamiento en un ambiente determinado.

Palemón *et al.* (2012), explica que con el análisis AMMI se conoce la aportación de cada fuente de variación a la suma de cuadrados total, lo cual permite entender mejor la respuesta compleja de las variedades para un carácter como el rendimiento de grano; además detecta variedades adecuadas para cada ambiente.

Canales *et al.* (2016), citando a Zobel (1988), expone que, en los métodos multivariados, el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI), consiste esencialmente en combinar las técnicas del análisis de varianza y el análisis de componentes principales (ACP) en un sólo modelo.

Índices De Selección

Cuando la selección en una especie de cultivo involucra varias características el uso de un índice de selección debe ser tomado en cuenta, debido a que esta metodología incluye la combinación de distintas características, de tal forma que cada individuo tiene un valor índice sobre el que la selección es aplicada como si fuera una característica simple (Rojas, 2013).

Tucuch *et al.* (2011), citando a Bujak *et al.* (2007), menciona que la respuesta a la selección podría ser más eficiente si se consideran simultáneamente otros caracteres con alta heredabilidad y positivamente correlacionados con el rendimiento.

Ceron *et al.* (2005), mencionan que en la actualidad existen varios métodos de los cuales se apoya el mejoramiento genético para hacer selección simultánea de varios caracteres y, los tres de mayor importancia son: selección en tándem, selección simultánea de caracteres independientes e índice de selección (IS).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Material Genético

El material genético utilizado en esta investigación constó de 48 cruzas simples de porte normal, pertenecientes al programa de mejoramiento del Bajío, del Instituto Mexicano del Maíz (IMM) Dr. Mario E. Castro Gil, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y 12 materiales utilizados como testigos de las empresas Asgrow, Dekalb y Pioneer, para comparar el comportamiento en tres ambientes. Los híbridos utilizados como testigos fueron los siguientes: DK2069 (Dekalb), P3265W (Pioneer) y Antílope (Asgrow); cada uno se utilizó en 4 ocasiones distribuidos estratégicamente por localidad, lo que dio como resultado 12 materiales testigos.

Los cruzamientos entre las líneas se realizaron en el campo directo del Instituto Mexicano del Maíz durante el ciclo P-V del 2020, obteniendo de esta forma las cruzas simples posibles. Estas cruzas se ensayaron para observar su comportamiento agronómico en tres ambientes del Bajío Mexicano en el ciclo P-V del 2021.

Ubicación Del Sitio Experimental

Los ambientes de evaluación se ubican estratégicamente en distintos lugares del Bajío Mexicano, exactamente en Cuerámara, Yuriria, y Charco de Pantoja, los tres sitios correspondientes al estado de Guanajuato. La descripción general de ubicación y las condiciones ambientales se presentan a continuación en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Localización geográfica y condiciones agroecológicas de los ambientes de evaluación utilizadas en este proyecto de investigación.

Año	Ambientes	Coordenadas Geográficas		
		Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altitud (m s.n.m.)
2021	Cuerámaro, Gto.	20° 37' 36"	101° 40' 19"	1,725
	Yuriria, Gto.	20° 12' 43"	101° 7' 59"	1,740
	Charco de Pantoja, Gto.	20° 23' 39"	101° 11' 35"	1,753

Descripción Climática

Las condiciones climáticas que presenta cada uno de los sitios donde se realizó la siembra de los materiales se presentan a continuación en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Condiciones climáticas de los ambientes de evaluación utilizadas en el proyecto de investigación.

Ambientes	Temperatura Media Anual (°C)	Precipitación Media Anual (mm)	Tipo de Clima (Clasificación de Köppen)
Cuerámaro, Gto.	18.9	724.2	Cwa
Yuriria, Gto.	19.2	714.0	Cwa
Charco de Pantoja.	19.8	564.9	Cwa

Fuente: INAFED, 2018.

Diseño Experimental

El establecimiento de los experimentos se realizó bajo un diseño de bloques al azar con arreglo alfa látice con dos repeticiones por ambiente. La unidad experimental consistió en dos surcos de 4 m cada uno, en el cual se sembraron 35 semillas por surco, espaciadas a 11.3 cm entre planta y planta. La distancia entre surcos fue de 0.8 m, dando una densidad total de 110,000 plantas por hectárea.

Siembra

La siembra se realizó de manera mecánica por medio de una sembradora de precisión tipo Almaco. Las fechas en las cuales se llevó a cabo la siembra para cada localidad fueron las que se expresan en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Descripción de las fechas de siembra y condiciones de temperatura promedio en cada ambiente.

Ambiente	Fechas	Temp. Media Anual (°C)
Cuerámara, Gto.	17 de abril de 2021	18.9
Yuriria, Gto.	18 de abril de 2021	19.2
Charco de Pantoja, Gto.	19 de abril de 2021	19.8

Fuente: Advanta

Fertilización

La fórmula de fertilización fue 250N-115P-100K ha⁻¹, aplicando la mitad de nitrógeno con todo el fósforo y el potasio a la hora de la siembra (50% de N y 100% de P y K). La otra mitad del nitrógeno se aplicó a la hora de realizar el primer cultivo y en una etapa V5.

Riegos

Los tres ensayos de rendimiento se sembraron en tierra venida y posteriormente se aplicó el riego de emergencia de plántula por riego rodado. Después de esto, dependiendo de las condiciones ambientales y aprovechando humedades en el

suelo por medio de las lluvias, solo se agregaban riegos de auxilio cuando la planta requería más agua.

Labores Culturales

Las labores culturales realizadas durante el ciclo del cultivo fueron de manera oportuna, de acuerdo con las condiciones y necesidades en cada uno de los ambientes de evaluación, para hacer más eficiente el trabajo y poder obtener los mejores resultados.

Control De Malezas

El método utilizado para el control de malezas fue de forma químico, aplicando el producto comercial Convey® (i.a. Topramezone) junto con Atrazina, el cual se aplicó de manera postemergente, cuando la planta presentaba apenas 2 hojas verdaderas, con el fin de evitar una infestación de malezas.

Control De Plagas

Para el control de plagas, de igual forma se aplicaron productos químicos para poder controlarlas de una manera más eficiente como lo fue el producto Tirano (i.a. Cipermetrina) y Proclaim 5GS (i.a. Benzoato de emamectina) para controlar el gusano durante el desarrollo vegetativo y Malatión, para poder controlar las otras plagas como gusano alfilerillo en las primeras etapas vegetativas.

Variables Agronómicas Estudiadas

La toma de datos agronómicos se realizó en cosecha y a través de una trilladora New Holland combinada y especial para la realización de este trabajo.

Humedad De Grano (%H)

Es el porcentaje de humedad que contiene la semilla al momento de la cosecha.

Peso De Campo (PC)

El peso de campo se determinó basándose en el peso que poseía el grano de maíz al momento de la cosecha.

Rendimiento (REND):

Es el rendimiento estimado por parcela útil, expresado en t ha⁻¹ al 15.5% de humedad al que fue cosechado cada cruz simple. Éste se obtuvo al multiplicar el peso seco (PS) por el factor de conversión (FC).

$$PS = (1 - \%H) * PC$$

Donde: %H= Porcentaje de humedad del grano a la cosecha por parcela y PC= Peso de campo en Kg.

$$FC = (10,000/APU * 0.845 * 1000)$$

APU= área de parcela útil. Es el producto de la distancia entre surcos por la distancia entre matas por el número exacto de plantas por parcela; 0.845= constante para transformar el rendimiento de peso seco al 15.5% de humedad; 1000= constante para obtener el rendimiento en t ha⁻¹; y 10,000= valor correspondiente a la superficie de una hectárea en m².

Análisis Estadísticos De Los Datos Agronómicos

Análisis De Varianza Combinado

Primeramente, los datos de las variables de los genotipos a evaluarse fueron analizados bajo un diseño de bloques al azar con el programa estadístico SAS versión 9.0, en forma combinada a través de los ambientes, esto con la finalidad de saber si dentro de las variables existe diferencia entre híbridos, entre ambientes, así como la magnitud de la interacción.

El modelo lineal para el análisis combinado es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + R_{j(i)} + G_k + AG_{jk} + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Es la variable aleatoria observable que corresponde al i -ésimo ambiente, a la j -ésima repetición dentro de cada ambiente, al k -ésimo genotipo; μ = Media general;

A_i = Es el efecto del i -ésimo ambiente; $R_{j(i)}$ = Es el efecto de la j -ésima repetición dentro del i -ésimo ambiente; G_k = Es el efecto del k -ésimo genotipo; AG_{jk} = Es el efecto en conjunto del i -ésimo ambiente y el k -ésimo genotipo; E_{ijk} = Es el error experimental.

$i=1, 2, \dots A$, Ambientes.

$j= 1, 2, \dots R$, Repeticiones.

$k= 1, 2, \dots G$, Genotipos

Gráfico Biplot Del Modelo AMMI

Para correr los datos, las unidades en las que están representadas las variables deben estar estandarizadas para que estas puedan combinarse entre sí, ya que están en unidades diferentes (toneladas, porcentaje, etc.) por lo que se estandarizaron mediante la fórmula del valor Z, que se describe a continuación:

$$z = \frac{Y_j - \bar{Y}}{S}$$

Donde:

Z=Valor estandarizado; Y_j = Valor observado; \bar{Y} =Promedio; S= Desviación estándar

Una vez estandarizados los valores se utilizó el modelo AMMI para encontrar agrupaciones naturales entre las variables que se evaluaron (Rend, Hum), para construir un IS con las más representativas dentro de cada grupo.

Empleando el modelo AMMI bajo la siguiente fórmula

$$Y_{ij} = \mu_j + g_i + e_j + \sum_{k=1}^p \lambda_k Y_{ik} \alpha_{jk} + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} =Es la respuesta media de un genotipo i en un ambiente j ; μ_j = Media del ambiente j para todos los genotipos y en este modelo se estima por medio de $\mu_j = Y_j$; g_i =Efecto del i -ésimo genotipo; e_j = Efecto del j -ésimo ambiente; λ_k = Es el

valor propio del eje k de componentes principales; Y_{ik} = Son los vectores propios unitarios genotípicos asociados a λ_k ; α_{jk} = Son los vectores propios unitarios ambientales asociados a λ_k ; ϵ_{ij} = Error del genotipo i en el ambiente j; p = Número de ejes de componentes principales considerados en el modelo AMMI.

Índice De Selección (IS)

La metodología para la estimación de los IS fue dando seguimiento a la propuesta planteada por Barreto *et al.* (1991). La fórmula usada para estimar el índice fue la siguiente:

$$IS = \{[(Y_i - M_i)^2 * I_i] + [Y_j - M_j]^2 I_j + \dots + [(Y_n - M_n)^2 * I_n]\} \frac{1}{2}$$

Donde:

IS= índice de selección; $Y_{j..n}$ = Variable en unidades z (estandarizadas); $M_j \dots n$ = Meta de selección; $I_{j..n}$ = Intensidad de selección.

La intensidad de selección es el grado de importancia que se le asignan a cada una de las variables a ser utilizadas en la selección y toma valores de 0 a 10. Este valor es diferente para cada una de las variables, según el criterio del investigador. El valor de intensidad más pequeño (0) es asignado a la variable de menor interés y el valor más alto (10) representa la variable de mayor importancia.

La meta de selección correspondiente a cada variable se refiere a las unidades de desviación estándar del promedio el objetivo que se desea lograr con la selección; se toman valores de -3 a +3 que corresponde a un 99% dentro de una distribución normal. Con valores positivos se seleccionan genotipos que se encuentran por arriba de la media de la población y para los valores negativos se seleccionan genotipos que se encuentren por debajo de la media de la población.

Para Barreto *et al.* (1991) el índice de selección más bajo representa que el genotipo contiene las características que él está buscando o que se acerca mucho a este. Por el contrario, mientras más grande sea el valor del índice de selección, significa

que el genotipo es todo lo contrario de lo que buscamos. El mejor genotipo es aquel que tiene el valor más pequeño del índice.

En conclusión, los mejores híbridos serán aquellos que tengan buenas características agronómicas y presenten un IS más bajo conforme a los otros.

Criterios De Selección

Para la selección e identificación de híbridos que tengan buenas características agronómicas, las variables se integraron con base en un índice de selección; por lo tanto, los híbridos seleccionados van a ser aquellos que presenten el IS con valores inferiores a la media.

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación se presentan en este capítulo con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos e hipótesis planteados. Se analizó el comportamiento agronómico mediante pruebas de rendimiento de 60 híbridos evaluados en 3 localidades del estado de Guanajuato, de los cuales 48 de ellos son híbridos experimentales obtenidos durante el ciclo 2020 en “El Bajío” perteneciente al Instituto Mexicano del Maíz, de la UAAAN y los otros 12 de ellos son híbridos comerciales de empresas de Dekalb, Asgrow y Pioneer utilizados como testigos.

Se consideró el rendimiento, la estabilidad y la precocidad de los híbridos.

Análisis de Varianza General

La fase experimental se inició con la ejecución de un análisis de varianza mediante el modelo de bloques al azar, cuyos resultados se concentraron en el Cuadro 4.1.

En lo que respecta a la fuente de variación localidad, se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para ambas variables (rendimiento y humedad) debido probablemente a que las localidades no presentaron las mismas condiciones climáticas y que estas influenciaron en la variable respuesta, permitiendo hacer una discriminación de los híbridos. Sánchez *et al.* (2016), señalan en su trabajo que entre las localidades la expresión de las características bajo estudio es contrastante, debido a que hay condiciones ambientales inesperadas. Por lo que en este trabajo puede deducirse que se hayan presentado ciertas condiciones desfavorables para algunas localidades.

Con lo anterior se comprueba que el ambiente juega un rol importante en la expresión del fenotipo cuando se trabaja sobre caracteres cuantitativos y cualitativos. Así como la importancia de involucrar más ambientes de evaluación para tener un conocimiento más preciso del potencial del material genético en estudio (Hernández y De León, 2021).

Las repeticiones dentro de cada localidad resultaron ser eficientes, debido a que permitió observar diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) para la variable rendimiento, lo que permitió eliminar el efecto del error experimental para tener una mejor apreciación entre los híbridos. Según Hernández (2014), cuando se presentan diferencias significativas en la fuente de variación repeticiones dentro de localidad, indica que estas tienen una respuesta diferente en cada una de las repeticiones dentro de cada ambiente, modificando su desempeño y su expresión.

En la fuente de variación híbridos, se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) para ambas variables (rendimiento y humedad) indicando que entre los materiales de estudio existen diferencias en cuanto a su comportamiento. Tal como lo señala Gómez (2011), esta variación se atribuye a que en el análisis estadístico están considerando tanto a los híbridos experimentales como a los testigos comerciales pertenecientes a distintas empresas, por lo que se considera que la variación que existe se debe al origen genético de los materiales y a la diferente conformación de los híbridos experimentales.

Hernández, (2017) detectó diferencias significativas en la fuente de variación "híbridos" e indicó que estas diferencias suelen ser porque las líneas involucradas presentan discrepancia en cuanto a su ciclo biológico, grado de parentesco, tipo de planta y sobre todo al tipo de selección realizada, entre otros. Por tales motivos se diferenciaron unos de otros. Lo cual es de suma importancia, ya que al menos uno es diferente al resto, esto permitirá hacer una selección más adecuada y que más convenga al programa.

Cuadro 4.1. Análisis de varianza de 60 híbridos simples, evaluados en 3 localidades del estado de Guanajuato durante el ciclo P-V 2021.

F.V.	gl	Humedad (%)		Rendimiento (t ha ⁻¹)	
		SC	CM	SC	CM
Localidad (Loc)	2	1245.49	622.749**	350.73	175.365**
Repetición/Loc	3	5.81	1.94	42.31	14.106*
Híbridos (Hib)	59	276.36	4.684**	1779.23	30.156**
Loc*Hib	118	267.03	2.263**	728.02	6.17
Error	165		0.88		5.12
Total	347				
CV			6.66		18.01
Media			14.05		12.55
Máximos			16.15		17.5
Mínimos			12.28		6.97

* = significativo al punto 0.05 de probabilidad; **= significativo al punto 0.01 de probabilidad; FV= Fuentes de Variación; Repeticiones/Loc= Repeticiones dentro de las Localidades; gl= grados de libertad; SC= suma de cuadrados; CM= cuadrados medios; CV= Coeficiente de Variación.

Por último, en la fuente de variación de la interacción localidad por híbrido, se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) solamente en la variable de humedad. Según Tirado *et al.* (2018), la alta significancia observada para la IGA evidencia que los cultivares responden diferentemente en los ambientes y que esta interacción tiene gran magnitud. García *et al.* (2020), señala en su trabajo que al detectarse diferencias altamente significativas sugieren que el desempeño de los híbridos varía en función de la condición ambiental presente en cada localidad utilizada en el estudio.

Por lo tanto, cuando la variación genotipo ambiente es significativa esto indica que las cruzas no mantuvieron una humedad igual en los tres ambientes de evaluación; caso contrario con lo detectado en la variable rendimiento debido a que no se detectaron diferencias significativas, lo anterior indica que los ambientes no

modifican su expresión, es decir, los valores de la interacción no cambian para esta variable, como se observa en el Cuadro 4.1.

El efecto de la interacción genotipo ambiente (IGA) indica que cuando esta es significativa la selección requerirá del auxilio de herramientas que consideren los efectos de la IGA en el análisis, para ello se deben de utilizar los modelos multiplicativos que se diseñaron con este fin y que han demostrado su efectividad en trabajos reportados por Zobel *et al.* (1988), Yan *et al.* (2000) y Vargas *et al.* (2001).

Prueba de Rango Múltiple a través de Localidades

Las agrupaciones estadísticas de las localidades se muestran en el cuadro 4.2, donde se puede visualizar la media del rendimiento y de la humedad de las localidades: Charco de Pantoja (1), Cuerámaro (2) y Yuriria (3).

Cuadro 4.2. Agrupamiento estadístico de 3 localidades con base en las variables de rendimiento y humedad.

Localidad	Humedad (%)		Rendimiento (t ha ⁻¹)	
	Duncan	Media	Duncan	Media
1	B	12.73	A	13.24
2	A	16.67	A	13.30
3	B	12.58	B	11.05

Medias con la misma letra son estadísticamente iguales.

El Cuadro 4.2 nos indica que la localidad Charco de Pantoja (1) y Yuriria (3), son estadísticamente iguales para la variable humedad; también nos señala que la localidad Charco de Pantoja (1) y Cuerámaro (2), son estadísticamente iguales para la variable rendimiento. En un programa de mejoramiento genético vegetal la selección adecuada de ambientes que permitan la discriminación de híbridos es esencial, debido a que esto permite obtener información de mayor calidad, además de conocer que ambientes son idóneos para realizar evaluaciones de estabilidad.

En el Cuadro 4.1 indica que al menos una de las localidades es diferente al resto en las dos variables (Humedad y Rendimiento), lo que se puede observar con más detalle en el Cuadro 4.2, donde se aprecia cuáles localidades son estadísticamente iguales y diferentes en cada variable.

Aunque el ambiente 1 y 2 son estadísticamente iguales para la variable rendimiento, la localidad 2 cuenta con una mayor media de rendimiento, lo cual se atribuye a una mejor calidad de suelo, así como a condiciones climáticas favorables para el desarrollo del cultivo en particular durante ese ciclo.

Rojas (2009), indica que, cuando hay diferencias significativas en las localidades al menos una de las localidades es diferente al resto. Esto atribuido a las condiciones climáticas, edáficas y de manejo particulares de cada una de ellas.

En el Cuadro 4.3 se muestran 15 híbridos con la mejor media de rendimiento y humedad. En el cual se observa que 12 de los 15 híbridos son comerciales utilizados como testigos, y la existencia de 3 híbridos experimentales que mostraron un rendimiento y humedad promedio semejante entre ellos, estos fueron el híbrido 11 (0803*0804), 39 (1024*0908) y 50 (1021*1022).

Esto indica que los híbridos experimentales no son lo suficientemente rendidores en dichos ambientes, lo cual puede ser por motivo de baja heterosis entre los materiales o porque las condiciones climáticas no son lo suficientemente favorables para cada uno de ellos.

Es importante resaltar que las empresas privadas han seguido innovando con relación a la tecnología utilizada para mejorar la calidad de sus híbridos comerciales y poder ser más competitivos. Caso contrario a las instituciones públicas, como es el caso de la UAAAN, que se ha venido trabajando con el mínimo de recursos desde hace décadas, aun así, existen híbridos que están dentro de la media para poder competir, con empresas nacionales y transnacionales.

Medias con la misma letra son estadísticamente iguales.

Cuadro 4.3. Media general de rendimiento y humedad a través de 3 localidades de los mejores 15 híbridos evaluados durante el ciclo P-V 2021, con base en la prueba de Duncan.

Híbrido	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Agrupamiento Duncan	Híbrido	% Humedad	Agrupamiento Duncan
8	17.50	A	8	16.08	A B
29	16.90	A B	29	14.28	D E F G H I J K L M N O P Q R
49	16.55	A B C	49	15.83	A B C
56	16.12	A B C D	56	14.58	C D E F G H I J K L M N
36	16.03	A B C D	36	16.15	A
58	15.78	A B C D E	58	14.02	F G H I J K L M N O P Q R S T
1	15.78	A B C D E	1	14.10	E F G H I J K L M N O P Q R S T
22	15.68	A B C D E	22	15.34	A B C D E F
60	15.47	A B C D E F	60	15.45	A B C D E
59	15.33	A B C D E F G	59	14.40	D E F G H I J K L M N O P
42	15.08	A B C D E F G	42	14.56	C D E F G H I J K L M N O
11	14.78	A B C D E F G H	11	14.86	A B C D E F G H I J
39	14.48	A B C D E F G H I	39	13.85	G H I J K L M N O P Q R S T U
15	14.47	A B C D E F G H I	15	14.70	C D E F G H I J K
50	14.46	A B C D E F G H I	50	13.26	M N O P Q R S T U V

Análisis De Estabilidad Mediante El Modelo AMMI 1 Para Rendimiento.

El análisis AMMI 1 tiene en cuenta la respuesta no lineal de los híbridos y la variación ambiental por lo que es una herramienta apropiada especialmente donde las características de respuesta de los ambientes no se conocen.

La Figura 4.1 corresponde al modelo AMMI 1, en el que se presentan los resultados del modelo más simple y de más apropiada interpretación biológica, donde el eje de la abscisa (X) corresponde a la variable rendimiento y el eje de las ordenadas (Y) representa el primer componente principal (CP1) debido a la interacción genotipo ambiente.

Para la interpretación del análisis de componentes principales (ACP), la gráfica del componente principal 1 (CP1) con el rendimiento se divide en cuatro cuadrantes con la finalidad de facilitar su análisis: en el ángulo superior izquierdo se agrupan genotipos estables de bajo rendimiento, el ángulo superior derecho agrupa a los genotipos ideales, el ángulo inferior derecho incluye a los inestables pero de alto rendimiento, y el ángulo inferior izquierdo incluye a los inestables y de bajo rendimiento (Hassanpanah, 2010).

Con base en lo dicho anteriormente, se puede observar que el H29 (DK2069), es el único material ideal, puesto que se encuentra en el cuadrante superior derecho. Por otro lado, en el cuadrante inferior derecho se puede ver únicamente al híbrido H8 (P3265W), lo cual indica que es un material inestable, pero muy rendidor. En el cuadrante superior izquierdo se observa ciertos híbridos tales como el H58 (Antílope), H1 (DK2069), H60 (P3265W), H42 (DK2069), H39 (1024*0908), H50 (1021*1022), H17 (0813*0814), lo cual indica que son muy estables, pero de bajo rendimiento. Y por último se encuentra el cuadrante inferior izquierdo, en el cual se encuentran los híbridos más inestables y de bajo rendimiento; estos híbridos son el H40 (1006*1005), H41 (1008*1007), H35 (0923*0922), H44 (1012*1011), H25 (0903*0902), H10 (0125*0113), H12 (0805*0803).

En la Figura 4.1 puede apreciarse que los híbridos con rendimiento por encima de la media con interacción positiva y buena estabilidad son los Híbridos 49 (P3265W),

56 (Antílope) y 36 (Antílope), 58 (Antílope), 22 (P3265W), 60 (P3265W), en este orden, lo que indica que son los híbridos comerciales los que resultaron ser los más rendidores y estables en comparación con los híbridos experimentales. Rojas (2009), señala que un cultivar estable bajo condiciones de estrés poseerá una baja interacción genotipo por ambiente, un coeficiente de regresión cercano a 1.0 y un alto rendimiento. El híbrido 23 (0824*0823) y el 5 (0308*0307) fueron los de menor rendimiento promedio a través de los ambientes, sin embargo, fueron muy estables en los 3 ambientes.

Robles (2018), menciona que el ambiente que aparece casi en una línea perpendicular tiene medias similares y los que caen casi en línea horizontal tienen un patrón de interacción similar. Los ambientes A1 (Charco de Pantoja) y A2 (Cuerámaro) tienen una media de rendimiento muy similar.

Sin embargo, la localidad que presentó mejor comportamiento con base en la media de rendimiento fue la Localidad de Charco de Pantoja (A1). Por otro lado, las localidades de Cuerámaro (A2) y Yuriria (A3), fueron las más extremas, siendo la de Yuriria la que presentó menor media de rendimiento de las 3 localidades evaluadas.

Rojas (2009), expone que las localidades que presentan los valores índices más alejados de cero son de menor rendimiento y de menor estabilidad, ya que presentan los valores negativos del CP1 más retirados de cero; en cambio, las localidades que presentan el índice positivo más alto y el valor del CP1 más cercano a cero son aquellas que son las más rendidoras y con buena estabilidad.

Según García *et al.* (2021), en los resultados de su trabajo le permitieron inferir que el modelo fue apropiado para explicar la IGA en el conjunto de genotipos estudiados, a pesar del poco número de ambientes utilizados en el estudio.

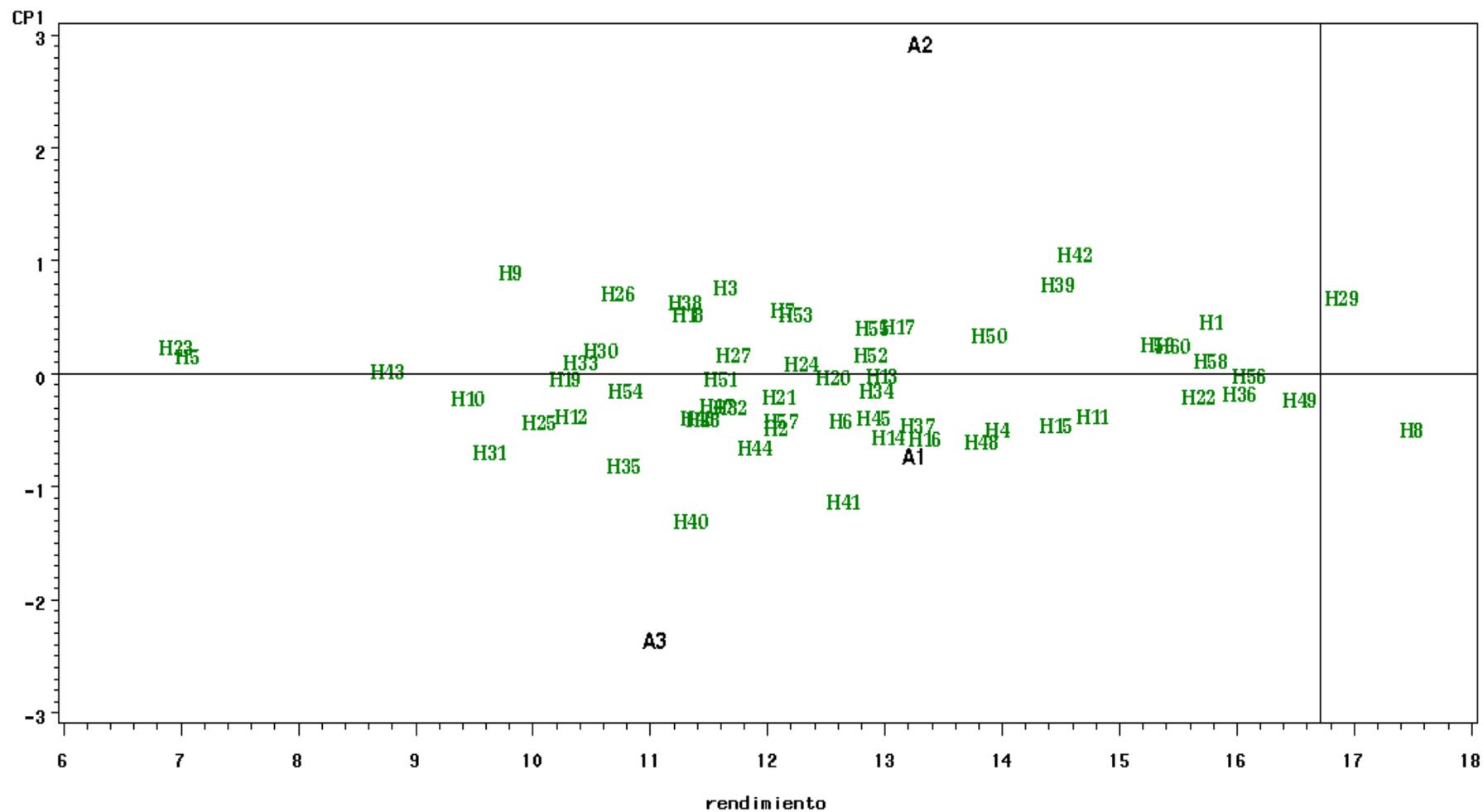


Figura 4.1. Biplot del AMMI 1 que muestra la respuesta a la interacción de 60 cruza simples de maíz evaluados a través de 3 ambientes del Bajío mexicano en el ciclo P-V 2021. Rendimiento de grano en toneladas por hectárea; CP1= Primer componente principal; H= Número al que corresponde cada híbrido evaluado; A1= Charco de Pantoja; A2= Cuerámara; A3= Yuriria.

Análisis de Estabilidad Mediante el Modelo AMMI 2

Con la finalidad de mejorar la precisión al momento de evaluar la interacción genotipo por ambiente, se utilizó el modelo multiplicativo AMMI 2, el cual, utiliza dos componentes principales en el análisis, ya que permite apreciar con mayor claridad la compleja interacción genotipo por ambiente.

El componente principal 1 (CP1) explica el 53.6% y el componente principal 2 (CP2) el 46.3%, de esta forma ambos componentes comprenden el 100% de la variabilidad debida a la IGA.

Robles (2018), citando a Gauch y Zobel (1996) y a Gauch (2006), menciona que el análisis AMMI 2 permite observar las diferencias existentes entre los ambientes (localidades) el grado de interacción de los genotipos con el ambiente, la estabilidad y las adaptaciones específicas de algunos genotipos a determinados ambientes. La Figura 4.2 corresponde al biplot AMMI 2 donde se aprecia simultáneamente el agrupamiento que muestran los genotipos.

Los ambientes que están más lejos del origen discriminan mejor a los cultivares precisamente porque el comportamiento de estos es diferente según las condiciones que se presentaron en los ambientes de evaluación (Medina *et al.*, 2020). Dicho por esto, se puede observar en la Figura 4.2. que los tres ambientes en los que se evaluaron los híbridos están alejados del origen, lo que indica un buen ejemplo para interpretar el concepto de la interacción genotipo por ambiente

Eeuwijk, (2006) indica que un ángulo menor de 90° o mayor de 270° entre el vector de un cultivar y un vector de sitio indican que el cultivar tiene una respuesta positiva al sitio de prueba. Tomando en cuenta esto, se puede observar que el A1 (Charco de Pantoja) tiene buena respuesta con los híbridos: 10, 48, 32, 21, 56, 51, 58, 54, 45; el A2 (Cuerámaro), tiene buena respuesta con los híbridos: 38, 29, 18; y el A3 (Yuriria) con los híbridos: 35, 40, 41, 16, 28, 8, 12, 37.

Caicedo *et al.* (2017), mencionan que, para observar la estabilidad de los híbridos experimentales evaluados, se encontró que los híbridos que resultaron con los valores más cercanos a cero, en la representación gráfica, permitió clasificarlos como estables.

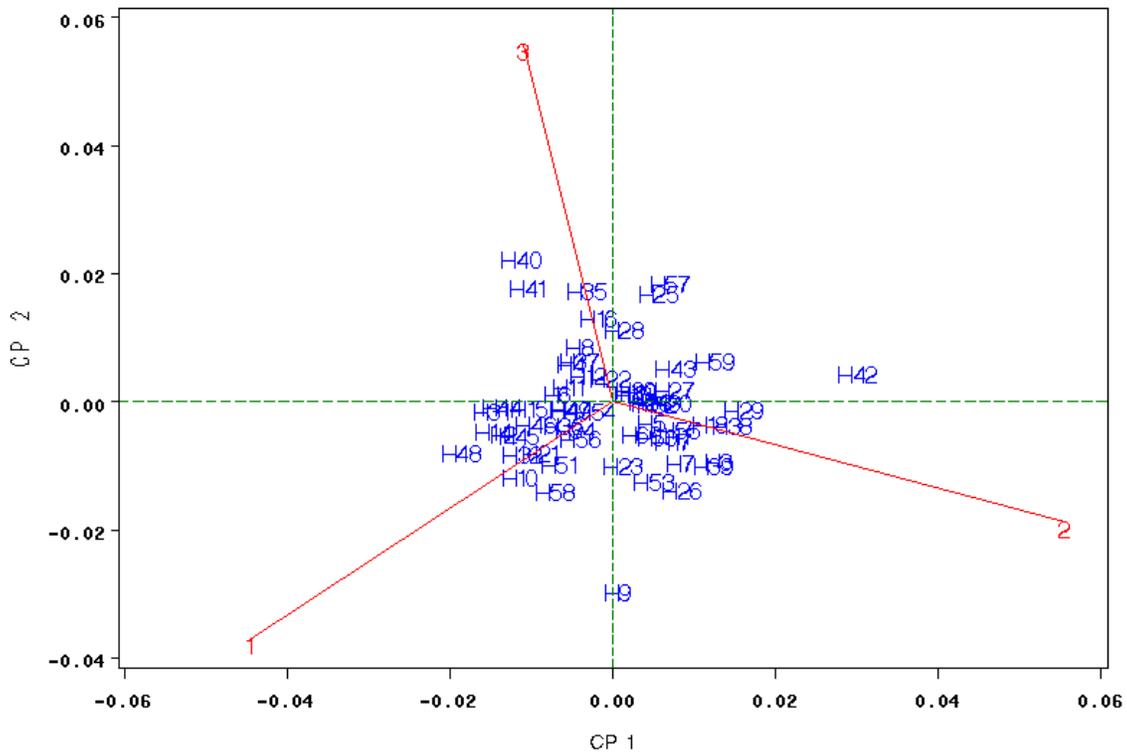


Figura 4.2. Biplot del AMMI 2 para el promedio de rendimiento de las cruzas simples de porte normal evaluado en tres ambientes del Bajío mexicano. H= Híbridos; CP1 y CP2= al primer y segundo componente principal, respectivamente; 1= Localidad Charco de Pantoja; 2= Localidad Cuerámara; 3= Localidad Yuriria.

Dicho por esto, la Figura 4.3 es un acercamiento del AMMI 2 biplot de la Figura 4.2, con el propósito de observar con mayor claridad los híbridos más cercanos al origen. Los híbridos más cercanos al origen son los más estables para las 3 localidades. Estos híbridos son el: 22, 13, 12, 34, 19, 20.

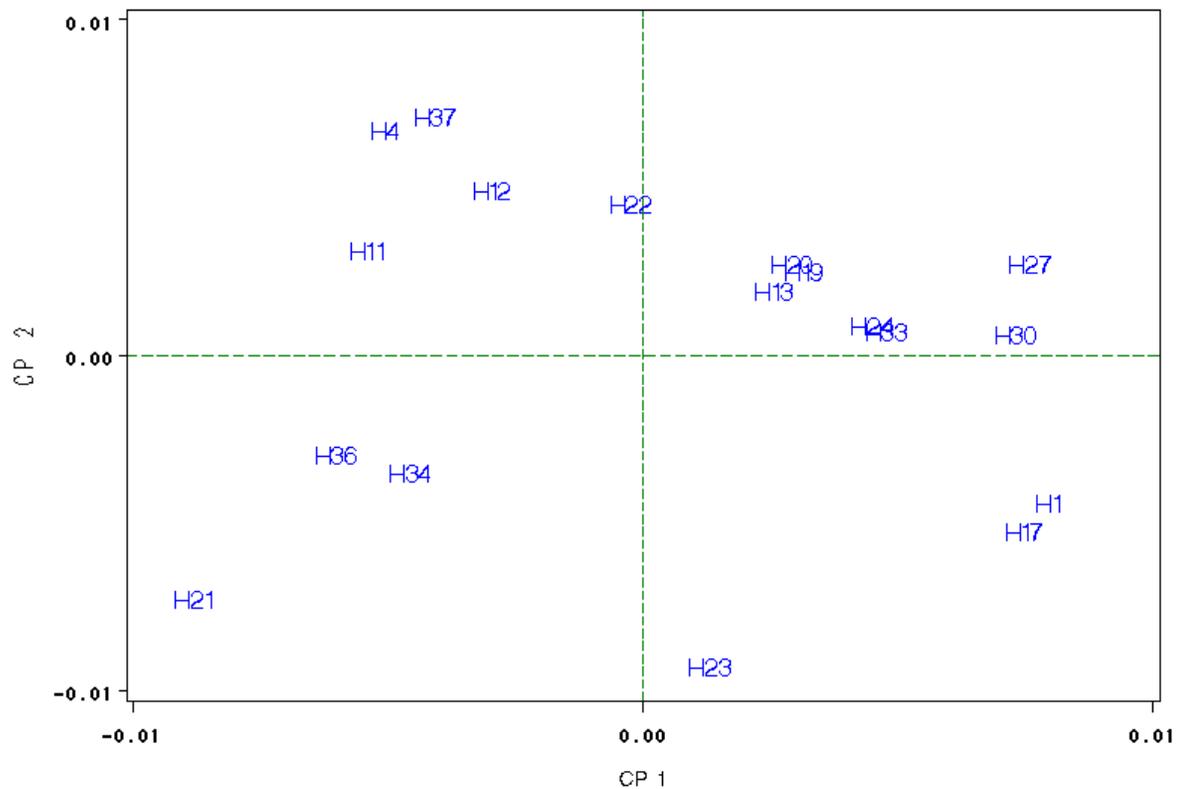


Figura 4.3. Zoom del Biplot AMMI 2 de la Figura 4.2 para el promedio de rendimiento de las cruzas simples de porte normal evaluado en tres ambientes del Bajío mexicano. H= Híbridos; CP1 y CP2= al primer y segundo componente principal, respectivamente.

Análisis De Varianza Del Índice De Selección

El índice de selección representa una buena estrategia para poder agrupar distintas variables, otorgándoles un solo valor. Por esta razón, se utilizó esta metodología para integrar las dos variables agronómicas de interés: Rendimiento y Humedad a la cosecha.

Los valores del índice de selección fueron estimados a través de la metodología descrita por Barreto *et al.* (1991), para ambientes y repeticiones, y fueron modelados para su interpretación a través de un análisis de varianza.

Se realizó el análisis de varianza del índice de selección. Respecto a la fuente de variación de localidades, se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) para el IS. Lo mismo fue en las fuentes de variación

Repetición e Híbrido, que también se mostraron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) para el IS, debido al objetivo de estudio que fue identificar a los mejores híbridos simples (Cuadro 4.4).

Rojas (2013), expone que cuando el análisis de varianza muestra diferencias significativas en todas las fuentes de variación indica que existen diferencias en los ambientes, en repeticiones y en híbridos. En la fuente de variación de híbridos, es debido a que al menos un híbrido es diferente y superior a los demás.

Cuadro 4.4. Análisis de varianza de los valores del índice de selección de 60 híbridos de cruza simples de maíz (48 experimentales y 12 testigos comerciales) evaluados en 3 localidades del estado de Guanajuato en el 2021.

FV	gl	SC	CM (IS)
Localidad	2	299.836	149.918**
Repetición	1	81.861	81.861**
Híbrido	59	1,004.416	17.024**
Error	297	1,647.756	5.548
Total	359		
CV			24.294
Medias			9.695
Máximos			14.006
Mínimos			6.91

* = significativo al punto 0.05 de probabilidad; **= significativo al punto 0.01 de probabilidad; FV= Fuentes de variación; CV= Coeficiente de Variación; gl= Grados de Libertad; SC= Suma de Cuadrados del Índice de Selección; CM (IS)= Cuadrados Medios del Índice de Selección.

Por lo tanto, en el Cuadro 4.4 nos indica que existieron diferencias en las tres localidades evaluadas, así como en las repeticiones. Y en los híbridos existe al menos uno diferente y superior a los demás, debido a que en el análisis se evaluaron en conjunto los híbridos tanto los comerciales de las empresas como los híbridos

experimentales de la UAAAN, por lo que se pudo identificar materiales superiores, lo que da como criterio para poder seleccionar a los híbridos sobresalientes de acuerdo con el valor del índice de selección.

Una vez realizado el análisis de varianza del índice de selección, donde se pudieron apreciar las diferencias altamente significativas, se procedió a seleccionar a los mejores híbridos, conforme al IS.

Selección de Híbridos Superiores con Base en el Índice de Selección

La creación de híbridos sobresalientes y sumamente exitosos es el objetivo que tiene cualquier programa de mejoramiento genético dedicado a la explotación de la heterosis (efectos de ACE), puesto que es el resultado final de todo el proceso continuo que se le ha dado al mejoramiento y es lo que se ofrecerá para ser comercializado y posteriormente sembrado por los agricultores, por lo que se deben de elegir solamente aquellos híbridos que cumplan con las características que exige el mercado y los que tengan los caracteres que sean sobresalientes.

En el Cuadro 4.5 se observan los 17 mejores híbridos con base al índice de selección (IS), de los cuales 10 de ellos son experimentales y los otros 7 son híbridos comerciales de las empresas Dekalb, Asgrow y Pioneer. Los híbridos con el valor más bajo del IS se consideraron como los mejores híbridos, caso contrario con los híbridos que presentaron un IS mayor.

En el Cuadro 4.5 se observan los híbridos seleccionados en donde, además del valor del índice de selección obtenido para cada uno de ellos, se agregó el valor de la humedad y del rendimiento que obtuvo cada uno de ellos, con el objetivo de ver y comparar el comportamiento de cada uno de los materiales evaluados en las 3 localidades.

Se puede observar la presencia de los híbridos comerciales de las empresas utilizados como testigos: DK2069, perteneciente a Dekalb, P3265W, que pertenece a Pioneer y Antílope de la empresa Asgrow.

Cuadro 4.5. Híbridos de maíz seleccionados mediante un índice de selección básico.

Identificación del híbrido	Híbrido	Índice de Selección	% Humedad	Rendimiento (t ha⁻¹)
DK2069	1	6.91	14.10	15.78
DK2069	29	7.10	14.28	16.90
1021*1022	50	7.34	13.17	13.89
1024*0908	39	7.43	13.85	14.48
Antílope	58	7.47	14.01	15.78
1019*1020	48	7.49	13.92	13.83
1107*0817	53	7.96	12.53	12.25
P3265W	22	7.98	14.84	15.68
Antílope	56	8.03	14.58	16.11
0306*0305	4	8.09	13.96	13.96
1101*0907	55	8.10	13.10	12.90
DK2069	59	8.14	14.40	15.33
0925*0924	37	8.16	13.38	13.28
DK2069	42	8.25	14.56	15.08
0803*0804	11	8.25	14.86	14.78
1104*1105	52	8.26	13.30	13.10
0819*0820	20	8.53	13.48	12.56

El híbrido DK2069 (Híbrido 1 y 29), obtuvieron el primer y segundo lugar con un índice de selección de 6.91 y 7.106, respectivamente, no obstante, también se encontró en el lugar 12 el Híbrido 59, con un IS de 8.143 y en el 14 el Híbrido 42 con 8.252 de los materiales seleccionados como los mejores, lo que nos indica que es un híbrido sobresaliente, rendidor y muy estable dentro de las localidades evaluadas.

Sin embargo, no dejamos de lado al Híbrido antílope (Híbrido 58 y el Híbrido 56), quien obtuvo el quinto lugar con un IS de 7.477 y en el noveno lugar con un IS de

8.033 de los mejores híbridos respecto al IS. El último testigo P3265W (Híbrido 22) estuvo en el octavo lugar con un IS de 7.989.

De los híbridos experimentales fueron el híbrido 1021*1022 (Híbrido 50) con un IS de 7.344 y el híbrido 1024*0908 (Híbrido 39) con un IS de 7.434, quien obtuvieron el tercero y cuarto lugar respectivamente de los mejores híbridos sobresalientes conforme al IS, superando a testigos como el Híbrido 58, 22, 56, 59 y al 42. Estos híbridos experimentales son excelentes materiales que pueden ser atractivos para el productor por su bajo contenido de humedad a la cosecha, lo que indica que son materiales más precoces que los comerciales, sin embargo, el rendimiento es relativamente menor que el de los híbridos comerciales.

V. CONCLUSIONES

El análisis de varianza permitió demostrar la existencia de diferencias en el comportamiento agronómico entre los híbridos tanto experimentales como comerciales, lo cual, hace posible realizar la selección.

La utilización del modelo AMMI 1 resultó ser muy útil para describir la interacción genotipo x ambiente, debido a la sencilla interpretación. Charco de Pantoja fue la localidad que obtuvo el mejor comportamiento con base en la media de rendimiento. El híbrido más estable y rendidor fue el H29 (DK2069), catalogado como el genotipo ideal.

La aplicación del modelo AMMI 2 permitió mostrar que los híbridos más cercanos al origen fueron los más estables para las 3 localidades. Estos híbridos fueron el 22 (P3265W), 13 (0807*0808), 12 (0805*0806), 34 (0921*0920), 19 (0818*0817) y 20 (0819*0820).

La selección de híbridos bajo el criterio de un índice de selección básico permitió seleccionar a los mejores 17 híbridos con un comportamiento agronómico superior al considerar las características de rendimiento y de humedad, de los cuales 10 resultaron ser experimentales y 7 fueron híbridos comerciales utilizados como testigos.

Con base en el IS básico se pudo observar que el mejor híbrido fue el 1 (DK2069) y el más rendidor fue el 29 (DK2069), sin embargo, el híbrido con mayor precocidad fue el 55 (1101*0907)

De esta forma, se pudo identificar a los híbridos más estables y rendidores, a través de las localidades, lo que resultó de mucha utilidad e importancia para seguir avanzando con el programa de mejoramiento del Instituto Mexicano del Maíz.

VI. LITERATURA CITADA

- Barreto H. J; Bolaños, J. A. y Córdova, H. S. 1991. Programa índices de selección, Guía para la operación de software. Manual de Capacitation Regional. México. CIMMYT. p. 20.
- Caicedo, V. M., Ledezma, D. I., Villavicencio, L. J., Saltos, R. E., Alarcón, C. F. 2017. Estabilidad ambiental en híbridos de maíz usando el modelo AMMI en el litoral ecuatoriano. Rev. ESPAMCIENCIA. Vol. 8(1):23-32.
- Canales, I. E., Tadeo, R. M., Mejía, C. J., García, Z. J., Espinosa, C. A., Castillo, G. F., Sierra, M. M., Gómez, M. N. 2016. Estabilidad del rendimiento de grano en híbridos trilineales androesteriles de maíz para Valles Altos de México. Rev. Mex. De Cienc. Agríc. Vol. 7(8):1815-1827.
- Cervantes, O. F., Hernández, E. J., García, R. J., Rangel, L. J., Andrio, E. E., Mendoza, E. M., Rodríguez, P. G., Rodríguez, M. D. 2018. Aptitud combinatoria general y específica de caracteres agronómicos en líneas de maíz (*Zea mays* L.) de baja endogamia. Chil. j. agric. anim. sci. Vol. 34(1):33-42.
- Cerón, R., Jesús, J., Sahagún, C. J. 2005. Un índice de selección basado en componentes principales. Agrociencia. Vol. 39(6):667-677.
- Eeuwijk, F. V. 2006. Genotype by environment interaction. Basics and beyond. In: Lamkey, K. R. and Lee, M. (Eds.). Plant breeding: the Arnel H. International Symposium. México. 155-170 pp.

- Escorcía, G. N., Molina, G. J., Castillo, G. F., Mejía, C. J. 2010. Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruces simples de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 33(3):271-279.
- Esquivel, E. G., Castillo, G. F., Hernández, C. J., Santacruz, V. A., García, S. G., Acosta, G. J., Ramírez, H. A. 2011. Heterosis en maíz del altiplano de México con diferente grado de divergencia genética. *Rev. Mex. De Cien. Agríc.* Vol. 2(3):331-344.
- García, M. P., Medina, C. D., Prieto, R. G., Manayay, S. D., Ortecho, L. R. 2021. Uso del modelo AMMI para el análisis de la interacción genotipo ambiente en variedades de maíz amiláceo de Tayacaja, Perú. *Rev. Tayac.* Vol, 4(1):9-24.
- García, M. P., Pérez, C. A., Silva, D. R., Álvarez, P. R., Pedro, P. M., Taramona, L. R. 2020. Evaluación del potencial agronómico de híbridos de maíz amarillo basado en el análisis GGE biplot y el modelo AMMI. *Bioagro.* Vol. 32(2):95-106.
- Gaytán, B. R., Mayek, P. N. 2010. Heterosis en híbridos de maíz producidos de cruzamientos entre progenitores de Valles Altos x Tropicales. *Invest. y Cienc.* Vol. 18(48):4-8.
- Guillen, D. P., De la Cruz, L. E., Castañón, N. G., Osorio, O. R., Brito, M. N., Lozano, D. A., López, N. U. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropic. and Subtropic. Agroecosyst.* Vol. 10:101-107
- Gutiérrez, R. E., Espinoza, B. A., Palomo, G. A., Lozano, G. J., Antuna, G. O. 2004. Aptitud combinatoria de híbridos de maíz para la comarca Lagunera. *Rev. Fit. Mex.* Vol. 27(1):7-11.
- Guzmán, M., Díaz, D., Ramis, C., Figueroa, R. R., Jiménez, R. 2017. Estimación de la aptitud combinatoria y heterosis en híbridos no convencionales de maíz con alto contenido de proteína. *Bioagro* Vol. 29(3):175-184.

- Hassanpanah D. 2010. Analysis of G×E Interaction by Using the Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) in Potato Cultivars. *International Journal Plant Breeding & Genetics*, 4:23-29.
- Hernández, A. E. 2014. Selección de híbridos en maíz precomercial con base a comportamiento agronómico y estabilidad para el sureste de México. Tesis Ing. Agrónomo en Producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila.
- Hernández, A. 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. M.C. Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila.
- Hernández, A. E., De León, C. H. 2021. Comportamiento genético para componentes de rendimiento en una población de maíz enano. *Rev. Mex. De Cienc. Agríc.* Vol 26(1):131-144.
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). 2018. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/inafed> (Consulta: octubre 2021).
- López, L. C., Tadeo, R. M., García, Z. J., Espinosa, C. A., Mejía, C. J. 2022. Aptitud combinatoria general y específica de híbridos varietales de maíz amarillo de baja endogamia. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* Vol. 12(4):699-711.
- Medina, H. A., Narro, L. L., Chávez, C. A. 2020. Cultivo de maíz morado (*Zea mays* L.) en zona altoandina de Perú: Adaptación e identificación de cultivares de alto rendimiento y contenido de antocianina. *Rev. Scient. Agrop.* Vol. 11(3):291-299.
- Montoro, A. 2018. Selección de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a partir de ensayos multiambientales. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.

- Nyaga, C., Gowda, M., Beyene, Y., Murithi, W. T., Burgueño, J., Toledo, F., Makumbi, D., Olsen, M. S., Das, B., Suresh, L. M., Bright, J. M., Prasanna, B. M. 2020. mejoramiento híbrido para la resistencia a MLN: heterosis, Combinando habilidad y predicción híbrida. *Plants*. Vol. 9(4):468p.
- Palemón, A. F., Gómez, M. N., Castillo, G. F., Ramírez, V. P., Molina, G. J., Miranda, C. S. 2012. Estabilidad de cruzas intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia* Vol. 46 (2):133-145.
- Ramírez, D. J., Chuela, B. M., Vidal, M. V., Ron, P. J., Caballero, H. F. 2007. Propuesta para formar híbridos de maíz combinando patrones heteróticos. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 30 (4):453-461.
- Rojas, G. R. 2009. Identificación de ambientes representativos para la discriminación de híbridos de maíz pre-comerciales. Tesis Ing. Agrónomo en Producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila.
- Rojas, G. R. 2013. Comportamiento de caracteres agronómicos y exploración de variables de clasificación mediante diferentes estrategias para el mejoramiento de maíz. Tesis M. C. Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila.
- Robles, S. V. 2018. Variación genotípica en rendimiento y calidad de fruto de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) En diferentes ambientes. Tesis M.C. Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila.
- Rodríguez, G. R., Ponce, M. J., Rueda, P. E., Avendaño, R. L., Paz, H. J., Santillano, C. J., Cruz, V. M. 2011. Interacción genotipo-ambiente para la estabilidad de rendimiento en trigo en la región de Mexicali, B.C., México. *Trop. and subt. Agroeco.* Vol. 14 (2):543-558.
- Sánchez, R. F., Mendoza, C. M., Mendoza, M. C. 2016. Estabilidad fenotípica de cruzas simples e híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 39 (3):269-275.

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2020. Panorama Agroalimentaria 2020. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. 198 pág. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/.../2020/Atlas-Agroalimentario-2020> (Consulta: septiembre 2021).
- Silva, D. R., Pérez, C. A., Medina, M. S., Vilorio, D. J., García, M. P., Duarte, A., Tablante, J., Pacheco, T. 2014. Estabilidad fenotípica de híbridos de maíz en Venezuela utilizando el índice de superioridad y la regresión lineal bisegmentada. *Agro. Trop.* Vol. 64 (2):107-120.
- Tirado, S. C., Vásquez, A. V., Narro, L. L. 2018. Análisis de la interacción genotipo por ambiente para rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en ensayos multi-ambiente. *Rev. Persp.* Vol. 19 (1):125-136.
- Tucuch, C. C., Rodríguez, H. S., Reyes, V. M., Pat, F. J., Tucuch, C. F., Córdova, O. H. 2011. Índices de selección para producción de maíz forrajero. *Agronom. Mesoam.* Vol. 22(1):123-132.
- Vargas, E. E., Vargas, S. J., Baena, G. D. 2016. Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas Agroecológicas de Colombia. *Acta Agron.* Vol. 65 (1):72-79.
- Vargas, M., Crossa, J., Van Eeuwijk, F., Sayre, K. D., Reynolds, M. P. 2001. Interpreting treatment x environment interaction in agronomy trials. *Agron. J.* Vol. 93:949-960.
- Vera, A. D., Liuba, D. G., Godoy, M. L., Díaz, O. E., Sabando, A. F., Garcés, F. F., Meza, B. G. 2013. Análisis de estabilidad para el rendimiento de híbridos de maíz (*Zea mays*) en la Región Central del Litoral Ecuatoriano. *Scient. Agrop.* Vol. 4 (3):211-218.
- Wagner, M. C., Renzo, G. V., Marcio, V. 2014. Prediction of maize single cross hybrids using the total effects of associated markers approach assessed by cross-validation and regional trials. *The Scien. Wor. Jour.* 14:1-9.

Yan, W., Cornelius, P. L., Crossa, J., Hunt, L. A. 2001. Two types of GGE for analyzing multi-environmental trial data. *Crop Sci.* 41:656-663.

Zobel, R., Wright, M. J., Gauch, H. G. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80:388-393.