

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISION DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Interacción genotipo-ambiente en híbridos comerciales de maíz

Por:

Kevin De Jesús Salinas Ramirez

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Torreón, Coahuila, México
Abril 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISION DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMINETO

Interacción genotipo-ambiente en híbridos comerciales de maíz

Por:

Kevin De Jesús Salinas Ramirez

TESIS

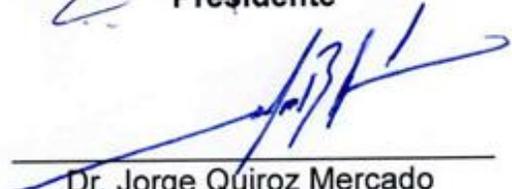
Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

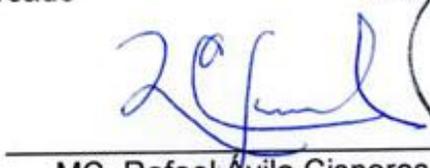
Aprobado por:


Dr. Armando Espinoza Banda
Presidente


Dra. Oralia Antuna Grijalva
Vocal


Dr. Jorge Quiroz Mercado
Vocal


MC. Jovane Jarama
Vocal Titular


MC. Rafael Avila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Abril 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISION DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMINETO

Interacción genotipo-ambiente en híbridos comerciales de maíz

Por:

Kevin De Jesús Salinas Ramirez

TESIS

Presentado como Requisito Parcial para obtener el título de:

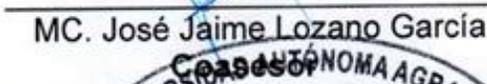
INGENIERO AGRÓNOMO

Aprobado por el Comité de Asesoría


Dr. Armande Espinoza Banda
Asesor principal


Dr. Jorge Quiroz Mercado
Coasesor


Dra. Oralia Antuna Grijalva
Coasesor


MC. José Jaime Lozano García
Coasesor


MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Abril 2025

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por ser el lugar donde forjé mi crecimiento profesional y personal. Gracias por abrirme las puertas y brindarme una educación de calidad que me permitió alcanzar una meta más en mi vida. Haber sido parte de esta institución representó un desafío lejos de mis seres queridos, pero también una experiencia enriquecedora que me ayudó a convertirme en una persona con principios y capaz de representar con orgullo el nombre de esta escuela en cualquier lugar.

Al **Dr. Armando Espinoza Banda**, le agradezco profundamente su apoyo, orientación y esfuerzo en la culminación de este trabajo de tesis, el cual marca el cierre de una etapa académica fundamental para mí. Sus conocimientos y enseñanzas han sido una guía invaluable, y su dedicación es un ejemplo de constancia y éxito que seguiré a lo largo de mi vida profesional.

A la **Dra. Oralia Antuna Grijalva**, por formar parte del comité asesor y por acompañarme en este proceso con su apoyo y compromiso, facilitando el desarrollo de este proyecto.

Al **Dr. Jorge Quiróz Mercado**, por su valiosa colaboración en el comité asesor y por brindarme su guía y respaldo durante todo mi trayecto en esta institución.

DEDICATORIAS

A mis padres

Salvador Salinas Martínez e Ida Ramírez Diego, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la dedicación y la perseverancia. Gracias por cada consejo, por cada sacrificio silencioso y por cada palabra de aliento que me ha impulsado a seguir adelante. Su amor y confianza en mí han sido el motor que me ha permitido alcanzar mis metas. No hay palabras suficientes para expresar cuánto los valoro y cuánto les debo. Este logro es también suyo.

A mis hermanos

Arturo Salinas Ramírez, José Salinas Ramírez y Deysi Salinas Ramírez, por ser mis compañeros de vida, mis aliados incondicionales y mis amigos más sinceros. Cada risa compartida, cada desafío superado juntos y cada muestra de apoyo han hecho que este camino sea más llevadero y especial. Gracias por estar ahí en los momentos de alegría y en los momentos de dificultad, por ser mi fortaleza cuando la necesitaba y por celebrar conmigo cada paso dado.

A mis abuelos

Por su sabiduría, sus historias y el cariño infinito que siempre me brindaron. Sus enseñanzas han sido un faro en mi vida, guiándome con valores firmes y principios inquebrantables. Su amor ha sido mi refugio en los momentos difíciles, y su ejemplo, una fuente constante de inspiración. Siempre llevaré en mi corazón sus palabras, su fortaleza y el amor con el que marcaron mi camino.

A todos ustedes, mi más profundo y sincero agradecimiento. Este logro es tan mío como suyo.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
INDICE.....	iii
RESUMEN	v
I.- INTRODUCCION	1
1.1. Objetivo.....	3
1.2. Hipótesis	3
II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1 Ubicación del sitio experimental.....	14
3.2 Material genético	14
3.3 Diseño experimental	14
3.4 Tamaño de la parcela	15
3.5 Siembra	15
3.6 Manejo de cultivo.....	15
3.7 Control de plagas	15
3.8 Control de malezas.....	16
3.9 Fertilización	16
3.10 Riegos	16
3.10.1 Cosecha.....	16
3.10.2 Variables evaluadas	16
3.10.3 Rendimiento de grano (RG)	16
3.10.4 Constante de la superficie cosechada (CSC)	17
3.10.5 Humedad de campo (HC)	17
3.10.6 Factor de humedad (FH)	17
3.10.7 Rendimiento de grano (RG)	17
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
V.- CONCLUSIONES	22

VI.- BIBLIOGRAFÍA.....	23
------------------------	----

INDICE DE FIGURA

Figura 4. 1 Rendimiento medio (kg/ha) de seis híbridos evaluados en tres años en la comarca lagunera.....	21
--	----

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.2 1 Genealogía de seis genotipos de maíz.	14
Cuadro 3.7 1 Control de plagas.....	15
Cuadro 3.8 1 Control de malezas.	16
Cuadro 4. 1 Análisis de varianza combinado de seis híbridos comerciales de maíz en tres ciclos (2020, 2021 y 2023).	19
Cuadro 4. 2 Valores medios de tres años de evaluación de seis híbridos comerciales.....	20
Cuadro 4. 3 Valores medios de rendimiento (kg/ha) de seis híbridos comerciales evaluados en tres años.	20

RESUMEN

El trabajo se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, en el ciclo primavera-verano durante los años 2020, 2021 y 2023. El objetivo del trabajo fue comparar el potencial de rendimiento de grano y la estabilidad de seis híbridos comerciales de maíz de la empresa ASGROW México: Antílope, Berrendo, Caribú, Canguro, Rx-717 y Armadillo. El diseño experimental utilizado fue en bloques al azar con seis tratamientos y tres repeticiones durante el periodo de 2020, 2021 y 2023. En los años 2020 y 2021 se utilizó un surco de 3 m de largo y surcos a 0.75 m para una densidad de 106,000 plantas por hectárea. Para el año 2023 se utilizó un sistema a doble hilera, con una distancia de 0.30 m entre hilera, 0.75 m entre surcos y, a 0.13m entre planta y planta obteniendo la densidad de 161,000 plantas por hectárea. La variable agronómica evaluada fue Rendimiento de Grano (RG). Para los efectos principales Años e Híbridos, se observaron diferencias significativas y altamente significativas respectivamente. La interacción A x H fue significativa. Se observó que el año 2023 y 2020 fueron estadísticamente iguales con valores de 11509.1 y 10748.7 kg/ha, superando al año 2021 con una media de 9439.7 kg/ha. También se observó que el híbrido Antílope, registro mayor rendimiento siendo de 13064.3 kg/ha, por lo que fue superior al resto de los híbridos. Canguro fue el híbrido con menor rendimiento (8512.3 kg/ha) y estadísticamente inferior al resto. Antílope fue el híbrido más estable.

Palabras clave: Maíz, Híbrido, Rendimiento, Estabilidad

I.- INTRODUCCION

El estudio de la interacción entre genotipo y ambiente es un factor clave en la selección y recomendación de cultivares, ya que permite mejorar la eficiencia en los programas de mejoramiento genético (Márquez *et al.*, 2020).

La interacción Genotipo-Ambiente (G×A) es un fenómeno común y esencial en la evaluación de la estabilidad de los cultivares, así como en el análisis de su adaptación, tanto general como específica, en los ambientes donde se pretende introducir. Además, esta interacción influye en la determinación del potencial productivo y en la identificación de las limitaciones en distintas localidades (Gutiérrez, 2010).

Para lograr el máximo aprovechamiento del potencial de un cultivo y del ambiente en el que se desarrolla, es fundamental una adecuada gestión agrícola, considerando la selección de cultivares con base en su rendimiento y adaptación a las condiciones del entorno (Bologna, 2018).

Uno de los principales desafíos en los programas de mejoramiento genético es desarrollar genotipos con mayores rendimientos. Sin embargo, la interacción G×A puede ocultar dicho potencial, dificultando su evaluación. Gordón-Mendoza *et al.* (2006) señalan que esta interacción se produce cuando los genotipos responden de manera diferenciada ante los cambios ambientales. En este sentido, Gauch y Zobel (1997) destacan la relevancia de la interacción G×A, señalando que "si no existiera esta interacción, se podría contar con una sola variedad de maíz (*Zea mays* L.), o cualquier otro cultivo que rindiera al máximo en todas partes del mundo, y además las pruebas de cultivares podrían realizarse en un solo sitio y proporcionar resultados aplicables a nivel global".

Determinar la magnitud de la interacción Genotipo × Ambiente es fundamental para evaluar la estabilidad de los cultivares en los distintos entornos donde se busca su introducción, así como para identificar sus ventajas y limitaciones en cada región (Contreras y Krarup, 2000).

En México, el maíz es el cultivo más importante debido a su papel esencial en la alimentación de la población. Se siembran alrededor de 8.5 millones de hectáreas, pero la producción nacional alcanza únicamente 22 millones de toneladas, lo que hace necesario importar entre 10 y 12 millones de toneladas de maíz amarillo, ya que el consumo total aparente del país oscila entre 32 y 34 millones de toneladas. El rendimiento promedio del cultivo es de 2.8 t ha⁻¹ (Turrent, 2009). Para 2018, se estimó que las importaciones alcanzarían los 15 millones de toneladas, convirtiendo a México en el principal importador de este grano a nivel mundial, superando a Japón (Espinosa y Tadeo, 2018).

El cambio climático ha generado modificaciones en las condiciones ambientales, afectando factores como la temperatura, la precipitación, las heladas, la sequía y la salinización del suelo. En este contexto, se recomienda estudiar la diversidad genética del maíz y su relación con estos cambios ambientales (Espinosa *et al.*, 2019).

El estado de Coahuila, ubicado en la región centro-norte de México, presenta un clima predominantemente seco a muy seco y semicálido. La precipitación media anual varía entre 350 y 450 mm, mientras que la temperatura media anual oscila entre 18 y 22 °C, con la presencia de heladas tempranas (INEGI, 2015). Estas condiciones climáticas representan un desafío para el crecimiento y rendimiento del maíz. En la zona sureste del estado, las siembras se realizan mayormente con variedades nativas (Rincón *et al.*, 2010), las cuales han desarrollado adaptaciones a los distintos nichos ecológicos que conforman la diversidad del maíz en la región (Arteaga *et al.*, 2016).

Por lo tanto, en la comarca lagunera para el año 2024 se sembraron en total una superficie de 54,855 ha de maíz, de lo cual 5,938 ha fueron para grano y 48,917 ha para forraje con rendimientos de 3.5 ton/ha para grano y 43.3 ton/ha para forraje (El siglo de torreón, 2024).

1.1. Objetivo

Comparar el potencial de rendimiento de grano y estabilidad en híbridos comerciales.

1.2. Hipótesis

H0: El rendimiento de grano y la estabilidad son semejantes en los seis híbridos.

Ha: El rendimiento de grano y la estabilidad son diferentes en los híbridos.

II.- REVISIÓN DE LITERATURA

El cultivo de maíz, en México es el más importante por ser el alimento principal de la población, en 2023, México destinó 6.94 millones de hectáreas a la siembra de maíz, lo que representó un ligero incremento del 0.5% en comparación con el año anterior. Sin embargo, debido a factores climáticos adversos y otras afectaciones, 504,911 hectáreas fueron declaradas siniestradas, lo que redujo la superficie cosechada a 6.44 millones de hectáreas. De esta superficie, el 75.9% correspondió a producción en temporal y el 24.1% a sistemas de riego, reflejando la importancia del régimen de lluvias en el cultivo de este grano. La producción total de maíz en 2023 alcanzó 27.5 millones de toneladas, un incremento del 3.8% respecto al año anterior. De esta producción, el 88% fue maíz blanco, utilizado principalmente para el consumo humano, mientras que el 11.6% correspondió a maíz amarillo, empleado mayormente en la industria y la alimentación animal. Para 2024, las proyecciones indican una posible reducción del 8.9% en la producción de maíz, lo que la situaría en aproximadamente 25.1 millones de toneladas. Este descenso se atribuye a factores como la disminución en la superficie sembrada, los efectos del cambio climático y posibles alteraciones en los patrones de lluvia (SIAP-SADER, 2024).

En México, las diversas variedades de maíces nativos no solo son esenciales para la producción de tortillas, sino que también son la base de una enorme cantidad de platillos tradicionales que forman parte del patrimonio culinario del país. Este cereal representa un pilar central en la gastronomía nacional y es una fuente de sustento para miles de familias en comunidades rurales. Sin embargo, el proceso de globalización ha propiciado un cambio en los sistemas de producción, favoreciendo la sustitución de los maíces criollos por híbridos desarrollados por empresas transnacionales, especialmente en aquellas zonas con alta productividad agrícola. Este fenómeno, sumado a factores como el abandono del campo, la pérdida de conocimientos bioculturales y los efectos del cambio climático, ha puesto en riesgo la permanencia y diversidad de los maíces nativos en el país (Fernández *et al.*, 2013).

El mejoramiento del maíz comenzó con los pueblos indígenas de México, quienes, a partir del teocintle (*Zea mays* spp. mexicana), seleccionaron cuidadosamente aquellas plantas con características favorables para la alimentación y el cultivo. Gracias a este proceso de selección, el maíz evolucionó hasta convertirse en el cultivo que hoy conocemos, dando origen a diversas variedades nativas, también llamadas criollas. A través de cruzamientos entre estas variedades y el desarrollo de nuevas razas, se logró la aparición de los híbridos modernos, caracterizados por su alto rendimiento. En las últimas décadas, el mejoramiento genético de los maíces criollos ha tomado mayor relevancia, impulsado por técnicas como la retrocruza. Los genetistas han mostrado un creciente interés en la conservación, mejora y distribución de estas variedades, reconociendo su importancia para la biodiversidad y la seguridad alimentaria. La mejora genética del maíz en México tiene una trayectoria de más de cincuenta años, en la cual se han aplicado distintos métodos, desde los tradicionales como la selección masal hasta los modernos, que permiten una mayor diferenciación entre los efectos genéticos y ambientales (Márquez-Sánchez, 2008).

En los sistemas agrícolas de temporal o seco, donde la producción de maíz (*Zea mays* L.) depende de la cantidad y distribución de lluvias, predominan variedades criollas, poblaciones nativas y sintéticas. En el estado de Coahuila, aproximadamente el 49 % del territorio presenta un clima seco y semiseco, el 46 % es extremadamente árido y solo el 5 % restante, en las zonas altas del sureste, cuenta con un clima templado subhúmedo. La temperatura media anual oscila entre 18 y 22 °C, y la precipitación pluvial media anual alcanza los 400 mm (INEGI, 2013).

Las poblaciones de maíz que se han adaptado a estas condiciones poseen atributos como resistencia a la sequía, tolerancia a plagas y enfermedades, y capacidad para reducir el impacto de variaciones ambientales. No obstante, estos sistemas agrícolas suelen ser de baja productividad debido a factores como la falta de asesoramiento técnico, problemas socioeconómicos y fenómenos climáticos adversos, como heladas y sequías (Aguirre *et al.*, 2011).

La interacción genotipo-ambiente (IGA) hace referencia a la respuesta variable de los genotipos según las condiciones ambientales (Tonk *et al.*, 2011). Este fenómeno es complejo, ya que involucra factores agroecológicos, climáticos y agronómicos, además de aspectos fisiológicos y genéticos que inciden en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Mohammadi *et al.*, 2016).

Dado el amplio rango de ambientes en los que se cultiva el maíz, los genotipos pueden presentar comportamientos diferenciados en función de su entorno (Abbott y Pistorale, 2011).

En el mejoramiento genético de plantas, el estudio de la IGA es fundamental para optimizar la selección de variedades, ya que muchos rasgos agronómicos esenciales, como el rendimiento, tienen herencia cuantitativa y están fuertemente influenciados por el ambiente (Abbott y Pistorale, 2011).

La magnitud de la IGA en el rendimiento del maíz resulta de la combinación de efectos genéticos, ambientales y su interacción, siendo estos últimos claves para evaluar variedades e identificar los mejores entornos de producción (Yan *et al.*, 2000). Comprender la IGA permite seleccionar genotipos estables y de alto rendimiento, facilitando su recomendación para la obtención de nuevas variedades comerciales (Lule *et al.*, 2015).

El uso de híbridos trilineales en los programas de mejoramiento genético del maíz ha crecido en las últimas décadas debido a que ofrecen un mayor rendimiento gracias a la heterosis. Herramientas como el modelo AMMI (Efectos Principales Aditivos e Interacciones Multiplicativas) han demostrado ser eficaces para evaluar la estabilidad y adaptación de los genotipos en diversos entornos (López *et al.*, 2019). Teóricamente, los híbridos de cruza doble generan el mayor rendimiento de grano, aunque su alto costo dificulta su comercialización, por lo que suelen utilizarse como base para desarrollar híbridos trilineales (González *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2011).

El comportamiento de las variables y las variedades en distintos ambientes de cultivo representa un desafío central en el mejoramiento genético de plantas. Las

diferencias entre el ambiente de selección y el de destino pueden afectar la eficacia del proceso selectivo. Se ha demostrado que la selección directa en el entorno donde se cultivará la variedad es más efectiva, ya que optimiza la adaptación específica y maximiza el rendimiento de los cultivos (Mederos *et al.*, 2021).

Durante los últimos 50 años, el avance en el mejoramiento genético, acompañado de prácticas agronómicas como una nutrición adecuada y la aplicación de riego, ha sido crucial para aumentar la producción de alimentos a nivel mundial (Gámez Vázquez, *et al.*, 2021). En este proceso, un factor clave para mejorar el rendimiento de los cultivos ha sido el análisis de la interacción genotipo-ambiente (G×A). Esta interacción hace referencia a la respuesta diferencial de los cultivares a las diversas condiciones ecológicas, y su comprensión es fundamental para optimizar la producción agrícola, especialmente en países como México, que cuenta con una gran diversidad climática y biológica. De hecho, la variabilidad ambiental en el país constituye una oportunidad para estudiar la interacción G×A, lo cual puede ayudar a identificar cultivares sobresalientes para diferentes condiciones y zonas agroecológicas (Gámez Vázquez, *et al.*, 2021).

Identificar el comportamiento de los cultivares y su rendimiento en distintos ambientes, como resultado de la interacción G×A, permite investigar las causas genéticas, fisiológicas, fenológicas y evolutivas subyacentes. Esto contribuye directamente al mejoramiento de la producción de alimentos, ya que permite seleccionar aquellos genotipos que ofrecen el mejor rendimiento bajo condiciones ambientales específicas, optimizando el uso de recursos en la agricultura. Este enfoque no solo mejora la productividad, sino que también busca aumentar la sostenibilidad en la producción agrícola, reduciendo los impactos negativos sobre el medio ambiente (Gámez Vázquez, *et al.*, 2021).

Una de las herramientas más poderosas en el mejoramiento genético es la genética cuantitativa, que permite estimar parámetros genéticos y entender los efectos pleiotrópicos que influyen en la variación genotípica de los rasgos cuantitativos, como el rendimiento y la resistencia a enfermedades. Según Vieira *et al.* (2012), el análisis cuantitativo permite el desarrollo de genotipos superiores, los

cuales tienen el potencial de ser más productivos y resistentes a las fluctuaciones ambientales. Sin embargo, el fitomejoramiento genético enfrenta desafíos, uno de los principales siendo la interacción genotipo-ambiente. Esta interacción es un fenómeno complejo que puede hacer que un genotipo responda de manera diferente a diversas condiciones ambientales, lo que dificulta la selección de cultivares con alto rendimiento de manera consistente a lo largo del tiempo y en distintas localizaciones (Lozano-Ramírez, *et al.*, 2015).

La interacción G×A es un factor determinante que puede limitar el progreso del mejoramiento genético al hacer que los cultivares se comporten de manera inconsistente en función del ambiente. Por ejemplo, un cultivar que tiene un rendimiento excelente en un ambiente específico puede no ser tan productivo en otro ambiente, lo que hace que la selección de genotipos estables sea un desafío. (Elmerich, *et al.*, 2021).

Este fenómeno es clave a la hora de elegir híbridos con alto rendimiento y estabilidad en su respuesta frente a distintas condiciones ambientales. El estudio detallado de la interacción G×A no solo permite mejorar la estabilidad de los cultivares, sino también identificar aquellos que están mejor adaptados a condiciones específicas, contribuyendo así a una agricultura más precisa y adaptada a las realidades locales. (Elmerich, *et al.*, 2021).

Según Nzuve *et al.*, (2013), la comprensión de la interacción G×A no solo ayuda a seleccionar genotipos adecuados para diferentes condiciones, sino que también facilita la identificación de genotipos con un comportamiento estable y alto rendimiento. Esto es particularmente relevante cuando los cultivares se cultivan en distintos lugares o cuando los ambientes de selección y destino no coinciden. En estos casos, la selección de cultivares debe realizarse con base en las condiciones específicas del ambiente de destino, lo que mejora la adaptación de las variedades y, en consecuencia, su rendimiento. Este enfoque permite que los cultivares lleguen a su máximo potencial bajo condiciones específicas, lo que mejora tanto la eficiencia como la sostenibilidad de la producción agrícola (Mederos-Ramírez & Ortiz-Pérez, 2021).

El genotipo de un organismo no cambia durante el estudio, pero su expresión fenotípica está influenciada por el ambiente en el que se desarrolla. Esto significa que el mismo genotipo puede presentar diferentes características fenotípicas en ambientes distintos. Por ejemplo, el rendimiento de un cultivar de maíz puede verse afectado tanto por su información genética como por las condiciones ambientales del lugar donde se cultiva. Además, esta interacción también varía según el ambiente y los genotipos presentes. La comprensión de estas interacciones es esencial para mejorar la precisión de la selección de cultivares (Gámez Vázquez, 2021).

El estudio de los mecanismos de adaptación de las especies vegetales a diferentes entornos ha sido un desafío en la genética vegetal. Un aspecto fundamental en esta área es la interacción genotipo-ambiente ($G \times E$), que explica cómo los genotipos se adaptan y responden a diversas condiciones ecológicas. Para entender esta interacción, se emplean herramientas avanzadas como el mapeo de rasgos cuantitativos (QTL) y los ensayos multiambiente (MET), que consisten en evaluar los mismos genotipos en diferentes lugares y durante varios años. Estas herramientas permiten identificar cómo varía el rendimiento de los cultivares según los diferentes entornos, lo que ayuda a seleccionar los más adecuados para cada ambiente (De Walsche, *et al.*, 2025).

La predicción del fenotipo a partir del genotipo es un desafío debido a la naturaleza poligénica de muchos de los rasgos de interés agrícola. Además, las interacciones entre el fenotipo y el ambiente complican aún más este proceso (Yanai, 2013).

A pesar de los avances en la genómica, la comprensión de cómo se especifican los rasgos complejos sigue siendo limitada. Los estudios sobre interacción $G \times A$ sugieren que las respuestas fenotípicas no son simplemente la suma de los efectos genotípicos y ambientales, sino que pueden dar lugar a patrones más complejos que afectan la variación fenotípica observada (Yanai, 2013).

El análisis de estabilidad es esencial cuando la interacción $G \times E$ es significativa. El uso de métodos biométricos y estadísticos, como los biplots, ayuda a identificar cultivares que tienen un rendimiento constante y adaptabilidad a diferentes ambientes. Estas herramientas visuales permiten analizar y visualizar la magnitud de la interacción $G \times E$, lo que facilita la toma de decisiones para la selección de genotipos que no solo sean productivos, sino también estables en diversas condiciones ambientales (Nigus & Bekana, 2021). En este sentido, el análisis de la interacción genotipo-ambiente es clave para seleccionar los cultivares más adecuados para condiciones específicas, mejorando así la producción agrícola y la estabilidad de los cultivos a lo largo del tiempo (Miranda, *et al.*, 2009).

Este tipo de análisis no solo tiene importancia para la investigación académica, sino también para la aplicación práctica en la agricultura, donde la selección de cultivares adaptados a condiciones ambientales particulares puede mejorar significativamente el rendimiento y la sostenibilidad de los cultivos (Miranda, *et al.*, 2009).

La comprensión de las causas ambientales (E) y genotípicas (G) de la interacción genotipo-ambiente (GEI) es crucial y tal ocurrencia de GEI es un desafío y una oportunidad para los fitomejoradores (Baraki *et al.*, 2014). Para desarrollar una nueva variedad es importante realizar ensayos multiambiente (MET) en los que, generalmente, se evalúa un conjunto de genotipos a lo largo de muchos años y ubicaciones (Yan y Hunt, 2001). La ejecución de ensayos multiambiente (MET) crea un espacio para que los fitomejoradores y agrónomos reconozcan ideotipos con una adaptabilidad específica en muchos entornos (Olivoto *et al.*, 2019).

En la actualidad, la selección del genotipo deseable considera múltiples rasgos en lugar de solo el rendimiento de grano. Predominantemente, el análisis MET se ejecuta con un enfoque especial en un solo rasgo, principalmente el rendimiento, para seleccionar el genotipo deseado (Baraki *et al.*, 2020; Pour-Aboughadareh *et al.*, 2023). Sin embargo, el uso de múltiples rasgos para seleccionar genotipos deseables es más preferible (Adewumi *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2023; Singamsetti *et al.*, 2023). Los fitomejoradores están ansiosos por buscar

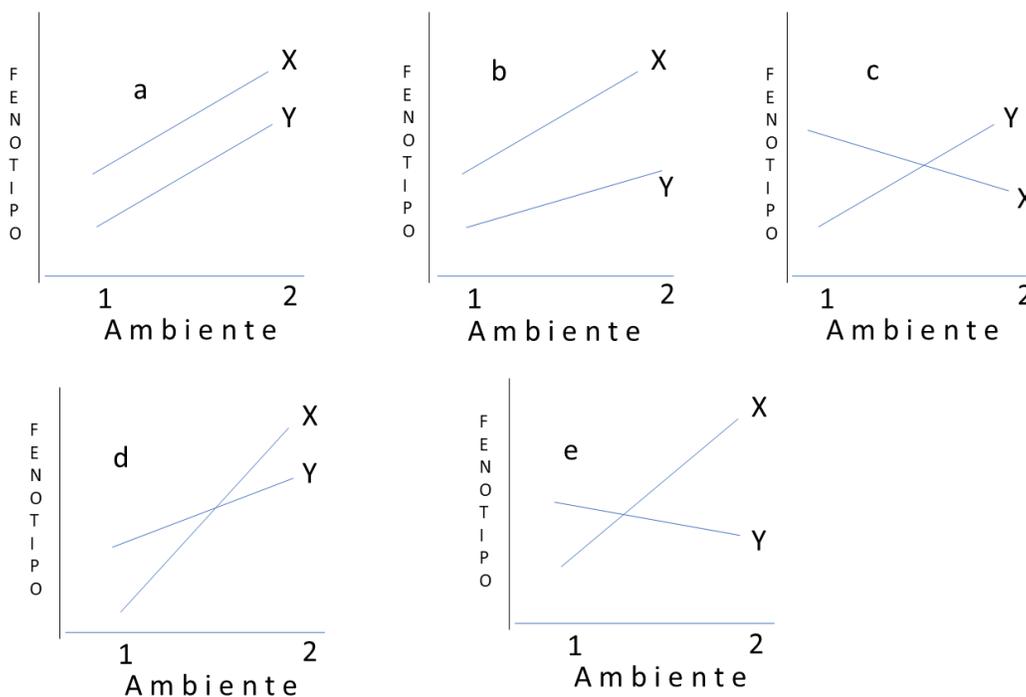
genotipos de alto rendimiento con mejores rasgos agronómicos y dicho genotipo objetivo se considera un ideotipo, que fue introducido por (Donald, 1968).

Para realizar y obtener dicho genotipo ideotípico en MET (Olivoto y Nardino, 2021) propusieron un nuevo método denominado índice de distancia genotipo-ideotipo multirasgo (MGIDI), que integra la selección simultánea para la estabilidad de múltiples rasgos en un índice único y fácil de interpretar.

La investigación de la interacción $G \times E$ implica considerar la heterogeneidad de la varianza y covarianza genética en diferentes entornos. La varianza genética se refiere a la variabilidad de un rasgo que se debe a diferencias genéticas entre individuos, mientras que la covarianza es una medida de cómo dos variables cambian juntas, en este caso, cómo los factores genéticos interactúan con los factores ambientales. Los entornos similares tienden a provocar respuestas similares en los genotipos, lo que conduce a fuertes correlaciones genéticas (Malòsetti *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2016; Van Eeuwijk *et al.*, 2016). Sin embargo, esto plantea desafíos al ajustar modelos para explorar los efectos de la interacción $G \times E$, ya que aumenta el número de parámetros estimados (Dawson *et al.*, 2013). Los modelos mixtos ofrecen un enfoque alternativo para analizar los ensayos MET, ya que proporcionan más información y flexibilidad para estimar los componentes de varianza e identificar parámetros genéticos y ambientales que están estrechamente relacionados con el rendimiento del genotipo. Esto ayuda a los criadores a tomar decisiones respecto a la recomendación de nuevas variedades (Resende *et al.*, 2004; Kelly *et al.*, 2007).

El rendimiento del cultivo, el fenotipo observado, es una función de genotipo: variedad o cultivar, ambiente y GEI. Se dice que GEI ocurre cuando diferentes los cultivares o genotipos responden de manera diferente a diversos ambientes. Los investigadores están de acuerdo en que GEI es importante solo cuando es significativo y causa un cambio significativo en los rangos de genotipo en diferentes ambientes, es decir, diferentes genotipos son superiores en diferentes ambientes (Haldane, 1946).

Tipos de interacción genotipo-ambiente. Haldane (1946), representa gráficamente los tipos de GEI: (a) sin interacción — respuestas X e Y paralelas en los dos ambientes; (b) tipo de interacción no cruzada: tanto X como Y aumentan pero intergenotípicos desiguales diferencia en los dos ambientes; (c) interacción cruzada: modificación genotípica por medio ambiente en dirección opuesta, pero la diferencia intergenotípica sigue siendo la misma; (d) interacción cruzada: desigual diferencia intergenotípica pero tanto X como Y aumentan; y (e) interacción cruzada - intergenotípica desigual diferencia en los dos entornos: X muestra un aumento mientras que Y muestra una disminución en el entorno 2.



En 2021, Torreón experimentó temperaturas características de su clima semiárido, con veranos calurosos e inviernos templados. Durante los meses de verano, especialmente en junio, julio y agosto, las temperaturas máximas promedio oscilaron entre los 35 °C y 40 °C, con picos que en ocasiones superaron los 40 °C. Las temperaturas mínimas durante estos meses rara vez descendieron por debajo de los 25 °C, lo que resultó en noches cálidas. En contraste, los meses de invierno,

como diciembre y enero, registraron temperaturas máximas promedio entre 20 °C y 25 °C, mientras que las mínimas oscilaron entre 10 °C y 15 °C. Estas condiciones reflejan la variabilidad térmica típica de la región, con una marcada diferencia entre las estaciones (Weather Spark, 2021)

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los ambientes, los genotipos y la interacción entre ambos, lo que indica que los genotipos respondieron de manera distinta según el entorno en el que fueron evaluados. Este resultado es comprensible, ya que, aunque las localidades analizadas se encuentran a una altitud similar, la evaluación se llevó a cabo en tres ambientes bajo condiciones de secano. Además, factores como las características del suelo y la fecha de siembra influyeron en la variabilidad de la respuesta observada en los genotipos evaluados (Espinosa *et al.*, 2008a).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del sitio experimental

El trabajo se realizó en el área de investigación situada en la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN), sede Unidad Laguna, en Torreón, Coah., Mex., Localizado en las coordenadas 103°26'33" latitud oeste y 25°32'40" latitud norte, con 1,120 m de latitud, la temperatura media anual es de 20 a 22.3 °C, tipo de suelo con textura migajón arcillosa y bajos contenidos de (MO) materia orgánica. El clima es seco, semicalido con una precipitación media anual de 225 mm.

3.2 Material genético

Se utilizaron seis (6) genotipos diferentes (Cuadro 3.2.1) de la empresa ASGROW México.

Cuadro 3.2 1 Genealogía de seis genotipos de maíz.

Genotipo	Tipo de material
Antílope	Cruza simple modificada
Berrendo	Cruza simple modificada
Caribú	Cruza simple modificada
Canguro	Cruza simple modificada
Rx-717	Cruza doble
Armadillo	Cruza simple modificada

3.3 Diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques al azar con seis tratamientos y tres repeticiones durante el periodo de 2020, 2021 y 2023.

3.4 Tamaño de la parcela

En los años 2020 y 2021 se utilizó un surco de 3 m de largo y surcos a 0.75 m para una densidad de 106,000 plantas por hectárea.

Para el año 2023 se utilizó un sistema a doble hilera, con una distancia de 0.30 m entre hilera, 0.75 m entre surcos y, a 0.13m entre planta y planta, obteniendo una densidad final de 161,000 pl/ha.

3.5 Siembra

La siembra se realizó de forma manual colocando dos semillas por golpe a una distancia de 13 cm entre planta y planta, en surcos de m de longitud con una distancia de 75 cm entre surco y surco para obtener una densidad final de 106,000 Pl/ha.

3.6 Manejo de cultivo

Se realizó el primer aporque a los 25 DDS para poder evitar la compactación del suelo y así poder oxigenar las raíces de las plantas.

A los 15 días después del primer aporque se realizó el segundo aporque para seguir evitando la compactación del suelo.

3.7 Control de plagas

El manejo agroquímico para el control de plagas se describe en el cuadro 3.7.1.

Cuadro 3.7 1 Control de plagas.

Plagas	Insecticida	Dosis
Gusano cogollero (<i>Spodoptera frugiperda</i>)	Tiodicarb + Triflumuròn	350 ml ha ⁻¹
Araña roja (<i>Tetranychus urticae</i>)	Abamectina	750 ml ha ⁻¹
Pulgón (<i>Aphididae</i>)	Dimetoato	1 L ha ⁻¹

3.8 Control de malezas

El control químico de malezas se describe en el cuadro 3.8.1.

Cuadro 3.8 1 Control de malezas.

Época de control	Producto	Dosis
Pre-emergente	Hierbamina	1 L/Ha
A los 18 dds*	Elumis	1.5 L/Ha
A los 35 dds*	Sansón	1 L/Ha

*dds=días después de la siembra

3.9 Fertilización

La fertilización en los años 2020 y 2021 fue con la dosis de 200-100-00 (NPK) y en el 2023 de 250-120-00 (NPK).

3.10 Riegos

El sistema de riego en los años 2020-2023 fue por goteo, con una presión de 15 Lb utilizando cintilla calibre 6000, emisores a 20 cm teniendo un gasto de riego de 1 L/h.

3.10.1 Cosecha

Se recolectó todas las mazorcas útiles de la parcela, realizándolo cuando las plantas alcanzaron la madurez fisiológica, es decir cuando los granos presentaron la capa negra.

3.10.2 Variables evaluadas

Para el presente trabajo solo se utilizó la variable rendimiento de grano de los tres años.

3.10.3 Rendimiento de grano (RG)

El rendimiento de grano se calculó con la siguiente fórmula y se expresó en Kg/Ha.

$$Rg = (Pg * CSC) * FH/100$$

Dónde: Rg: rendimiento de grano, Pg: peso de grano, CSC: constante de la superficie cosechada y FH: factor de humedad.

3.10.4 Constante de la superficie cosechada (CSC)

La constante de la superficie cosechada se determinó con la siguiente fórmula:

$$\text{CSC} = (10000/1000) / \text{Sc}$$

Dónde: Sc: superficie cosechada.

3.10.5 Humedad de campo (HC)

Se utilizó el determinador de humedad marca Dickey-Jonh Mini modelo MT-16, utilizando una muestra de 250 g el cual se expresó en porcentaje (%).

3.10.6 Factor de humedad (FH)

Para ajustar la humedad de campo a 14% se utilizó el factor de humedad y la cual determinada con la formula siguiente:

$$\text{FH} = (100 - \text{HC}) (100) / 85.5$$

3.10.7 Rendimiento de grano (RG)

Se obtuvo después de desgranar todas las mazorcas de la parcela útil. Se utiliza una báscula tipo SCIENTECH- Modelo N: SG8000 REV-D, para obtener el peso de grano total, donde se expresó en kilogramos (Kg).

Se realizó un análisis de varianza combinado para tratamientos y años en SAS versión 9.4, (2013). Como se muestra a continuación:

$$Y_{ijkl} = \mu + R_j + T_i + A_k + (T \cdot A)_{lk} + E_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} = Es la respuesta de la i-ésima línea en el k-ésimo bloque, en la j-ésima repetición.

μ = Es el efecto de la media general.

R_j = Es el efecto de la j-ésima repetición.

T_i = Es el efecto del i-ésimo tratamiento

A_k = Es el efecto del k-ésimo año en la j-ésima repetición y el i-ésimo tratamiento.

$(T*A)_{ls}$ = Es el efecto de interacción del i-ésimo tratamiento en el k-ésimo año.

ξ_{ijkl} = Es el efecto del error experimental.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza (cuadro 4.1) de seis híbridos evaluados en tres años se observa que para la fuente de variación años (A), se observó diferencias significativas igual que para la interacción años por híbridos (A x H), en tanto que para híbridos (H) la diferencia fue altamente significativa.

Lo anterior implica que los años (A) de evaluación fueron diferentes en las condiciones ambientales prevalecientes que forzaron a los genotipos o híbridos (H), a tener una respuesta diferencial para rendimiento, como se manifiesta en la interacción (A x H). Las diferencias en la interacción A x H indican que los híbridos responden de manera diferencial en cada uno de los ambientes de prueba. La magnitud del coeficiente de variación fue de 8.9 por ciento lo que sugiere que el manejo experimental fue adecuado. De acuerdo a (Espinoza *et al.*, 2008), encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los ambientes, los genotipos y la interacción entre ambos, lo que indica que los genotipos respondieron de manera distinta según el entorno en el que fueron evaluados.

Cuadro 4. 1 Análisis de varianza combinado de seis híbridos comerciales de maíz en tres ciclos (2020, 2021 y 2023).

FV	G.L	S.C	CM	FC
Año (A)	2	39446288.7	19723144.3	22.46 *
R/Año	6	4613018.6	768836.4	0.88
Híbridos (H)	5	94992897.8	18998579.6	21.63 **
A x H	10	114139991	11413999.1	13.00 *
Error	30	26346273.6	878209.1	
CV (%)	8.9			

Ns, *, **, =No significativo, significativo al 5% y al 1% de probabilidad.

En el cuadro 4.2 se presentan los rendimientos medios de los tres años de evaluación donde se observa que el año 2023 y 2020 fueron estadísticamente iguales con valores de 11509.1 y 10748.7 kg/ha respectivamente, superando al año 2021 con una media de 9439.7 kg/ha. Lo anterior supone que el año 2023 y el año 2020 fueron ambientalmente similares y diferentes al año 2021.

Cuadro 4. 2 Valores medios de tres años de evaluación de seis híbridos comerciales.

Años	Media
A2023	11509.1 a
A2020	10748.7 a
A2021	9439.7 b

†=Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales al 5% de probabilidad (Tuckey).

Los rendimientos medios de los seis híbridos evaluados (cuadro 4.3), donde Antílope con un rendimiento de 13064.3 kg/ha fue diferente y superior al restos de los híbridos probados. Canguro fue el híbrido con menor rendimiento (8512.3 kg/ha) y estadísticamente inferior al resto.

Cuadro 4. 3 Valores medios de rendimiento (kg/ha) de seis híbridos comerciales evaluados en tres años.

Híbridos	Media
Antílope	13064.3 a†
Caribú	10558.6 b
Berrendo	10551.4 b
Rx-717	10406.1 b
Armadillo	10302.2 b
Canguro	8512.3 c

†=Tratamientos con la misma letra son estadísticamente iguales al 5% de probabilidad (Tuckey).

En la figura 4.1 se muestran la representación gráfica de los seis híbridos comerciales evaluados en los años 2020, 2021 y 2023, donde se observa que el híbrido Antílope en promedio fue superior al resto de los híbridos, ya que mostro un incremento del año 2020 al 2023, al igual que el híbrido Canguro que con rendimientos menores siguió esta misma tendencia. El resto de los híbridos en cambio redujeron el rendimiento en el año 2021 y posteriormente se incrementaron en el año 2023 pero significativamente menor que el Antílope. De acuerdo a (Haldane, 1946), el híbrido Antílope y Canguro tuvieron una interacción no cruzada y para el resto de los genotipos se detectó una interacción cruzada efecto provocada por el ambiente del año 2021, donde redujeron su rendimiento, esta reducción en

teoría fue provocada por las temperaturas que prevalecieron en ese año, durante los meses Junio, Julio y Agosto, que afectaron el periodo de floración y el llenado de grano.

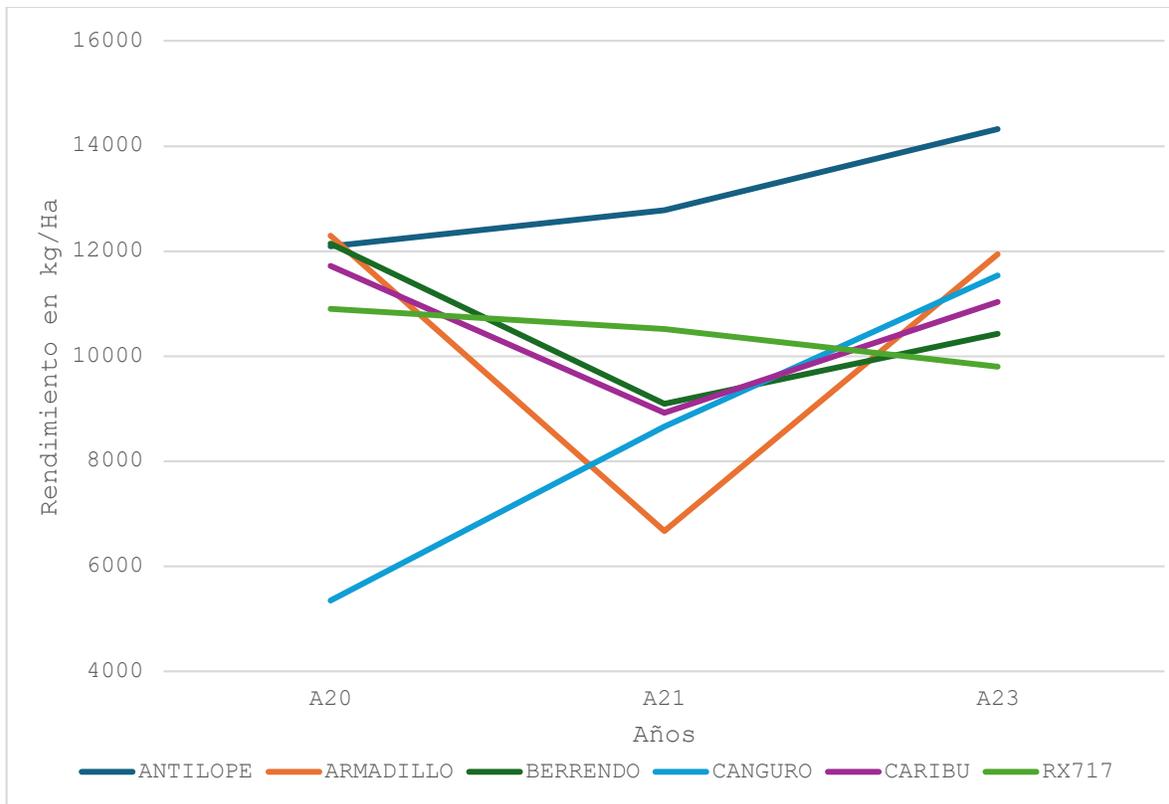


Figura 4. 1 Rendimiento medio (kg/ha) de seis híbridos evaluados en tres años en la comarca lagunera.

V.- CONCLUSIONES

Los años de evaluación fueron diferentes en las condiciones ambientales, ya que los seis híbridos respondieron de manera diferentes en cada uno de los ambientes por lo que tuvieron rendimientos diferentes.

Los años 2023 y 2020, fueron estadísticamente iguales con rendimientos medios de 11509.1 y 10748.7 kg/ha, por lo que superaron al año 2021 con una media de 9439.7 kg/ha. Esta gran diferencia de rendimientos en teoría se atribuye a las temperaturas extremas del año 2021.

El híbrido Antílope presentó un mayor rendimiento con una media de 13064.3 kg/ha, superando al resto de los híbridos y fue el de mayor estabilidad.

El Canguro fue el híbrido que tuvo el menor rendimiento con una media de 8512.3 kg/ha.

El híbrido Antílope y Canguro tuvieron incremento del año 2020 al 2023, además de una interacción no cruzada.

El resto de los híbridos redujeron el rendimiento en el año 2021, mostrando una interacción cruzada.

VI.- BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, L., y S. Pistorale. (2011). Análisis de la estabilidad y adaptabilidad de caracteres de interés agronómico en genotipos selectos de cebadilla criolla (*Bromus catharticus*). *Agriscientia* 28(2):109-117.
- Adewumi AS, Asare PA, Adejumobi II, Adu MO, Taah KJ, Adewale S., Mondo JM, Agre PA, (2023). Índice de selección de múltiples rasgos para características agronómicas y de calidad de tubérculos superiores en el ñame arbustivo (*Dioscorea praehensilis* Benth.). *Agronomía*, 13, 682.
- Aguirre M. V. J., F. Rincón S., R. Ramírez S., O. G. Colón A. y M. G. Razo M. (2011). Modelo para la Conservación de Maíces Criollos en el Sureste de Coahuila, México. Vicente Javier Aguirre Moreno, Saltillo Coahuila, México. 61 p.
- Arteaga MC, Moreno-Letelier A, Mastretta-Yanes A, Vázquez-Lobo A, Breña-Ochoa A, Moreno-Estrada A, Eguiarte LE, Piñero D. (2016). Genomic variation in recently collected maize landraces from Mexico. *Genomics Data* 7: 38-45.
- Baraki F., Gebregergis Z., Belay Y., Berhe M., Zibelo H., (2020). Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad del rendimiento de genotipos de frijol mungo (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) en el norte de Etiopía. *Alimentos y agricultura coherentes*, 6, 1729581.
- Baraki F., Tsehaye Y., Abay F., (2014). Análisis AMMI de la interacción genotipo x ambiente y estabilidad de los genotipos de sésamo en el norte de Etiopía. *Revista asiática de ciencias vegetales*, 13, 178
- Bologna S, Rojas E. Interacción genotipo ambiente y estabilidad de rendimiento en cultivares de soya en villa mercedes (SAN LUIS) [Internet]. (2018). [cited 14/01/2020]. Available from: Available from: https://www.researchgate.net/publication/320765344_interaccion_genotipo_ambiente_y_estabilidad_de_rendimiento_en_cultivares_de_soya_en_villa_mercedes_san_luis [accessed Jan 17 2019].

- Contreras S, Krarup C. Interacción genotipo por ambiente en cinco cultivares de espárrago (*Asparagus officinalis* L.). *Ciencia e Investigación Agraria*. (2000);27(3):133-139.
- Dawson JC, Endelman JB, Heslot N, Crossa J, Poland J, Dreisigacker S, et al. El uso de datos históricos no balanceados para la selección genómica en un programa internacional de mejoramiento de trigo. *Cultivos de campo Res*. (2013); 154:12–22.
- De Walsche, A., Vergne, A., Rincet, R., Roux, F., Nicolas, S., Welcker, C., Mary-Huard, T., Mezouk, S., & Charcosset, A. (2025). metaGE: Investigación de las interacciones genotipo x ambiente a través de un metanálisis GWAS. *PLOS Genetics*, 21(1), e1011553.
- El siglo de torreón (2024). Resumen económico y de noticias 2024. Número (24) El siglo de torreón.
- Elmerich, C., Faucon, M.-P., Garcia, M., Jeanson, P., Boulch, G., & Lange, B. (2021). Envirotipificación para controlar las interacciones genotipo-ambiente para el mejoramiento eficiente de la soja. *Agronomy*, 11(10), 1984.
- Espinosa, C.A., M. Tadeo, N. Gómez, M. Sierra, R. Martínez, J. Virgen, A. Palafox, F. Caballero, G. Vázquez, y M. Salinas. (2008). V-53 A variedad mejorada de polinización libre de grano amarillo para Valles Altos de México. En: Memoria Técnica No. 9, Día de Campo: CEVAMEX 2008. INIFAP, Chapingo, México. p. 33-34.
- Espinosa Tamayo, Lino César, Rincón Sánchez, Froylán, Ruíz Torres, Norma Angélica, Martínez Reyna, Juan Manuel, & Benavides Mendoza, Adalberto. (2019). Respuesta ambiental de poblaciones nativas de maíz del sureste de Coahuila, México. *Nova scientia*, 11(23), 00006. Epub 10 de marzo de 2020.
- Espinosa, C. A. y Tadeo, R. M. (2018). Importación record de maíz afrenta para México. *La Jornada*. 25 de febrero de 2018.

- Fernández Suárez, Rocío, Morales Chávez, Luis A., & Gálvez Mariscal, Amanda. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(Supl. 3-a), 275-283.
- Gámez Vázquez, A. J., Ávila Perches, M. A., de la O Olán, M., Gámez Vázquez, F. P., García Rodríguez, J. J., Zamora Díaz, M., Huerta Zurita, R., Virgen Vargas, J., Téliz Triujeque, R., & Palemón Alberto, F. (2021). La interacción genotipo-ambiente en la investigación agrícola (Libro Técnico Núm. 1). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Centro, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato. ISBN: 978-607-37-1221-7.
- Gauch H. G. and R. W. Zobel (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37:311-326.
- González, H. A.; Sahagún, C. J.; Vázquez, G. L. M.; Rodríguez, P. J. E.; Pérez, L. D. de J.; Domínguez, L. A.; Franco, M. O. y Balbuena, M. A. (2009). Identificación de variedades de maíz sobresalientes considerando el modelo AMMI y los índices de Eskridge. *Agric. Téc. Méx.* 35(2):189-200.
- Gordón-Mendoza R., I. Camargo-Buitrago, J. Franco-Barrera y A. González-Saavedra (2006). Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 17:189-199.
- Gutiérrez L. Importancia en el mejoramiento genético y en la evaluación y elección de cultivares [Internet]. (2010). [cited 14/01/2020]. Available from: Available from: <https://eva.udelar.edu.uy/mod/resource/view.php?id=91752>.
- INEGI (2015). Anuario Estadístico y geográfico de Coahuila de Zaragoza 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 505p
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2013). Información nacional por entidad federativa y municipios, estado de Coahuila de Zaragoza. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

- Kelly AM, Smith AB, Eccleston JA, Cullis BR. La precisión de la selección varietal utilizando modelos de análisis factorial para ensayos de mejoramiento de plantas en múltiples ambientes. *Ciencia de los cultivos*. (2007); 47(3):1063–70.
- Lee SY, Lee H.-S., Lee C.-M., Ha S.-K., Park H.-M., Lee S.-M., Kwon Y., Jeung J.-U., Mo Y., (2023). Ensayos multiambientales y análisis de estabilidad para características relacionadas con el rendimiento de cultivares comerciales de arroz. *Agricultura*, 13, 256.
- López-Morales, Fernando, Chura-Chuquija, Julián, & García-Pando, Gilberto. (2019). Interacción genotipo por ambiente del rendimiento de maíz amarillo en híbridos trilineales, Perú. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(4), 859-872.
- 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.
- Lule, D.D., M. Fetene, S. De Villiers, and K. Tesfaye. (2015). Additive main effects and multiplicative interactions (AMMI) and genotype by environment interaction (GGE) biplot analyses aid selection of high yielding and adapted finger millet varieties. *J. Appl. Biosci.* 76(3):6291-6303.
- Malosetti M, Ribaut JM, van Eeuwijk FA. El análisis estadístico de datos multiambientales: modelado de la interacción genotipo-ambiente y su base genética. *Fisioterapia frontal*. (2013); 4:44
- Márquez-Sánchez, Fidel. (2008). De las variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) a los híbridos transgénicos. I: recolección de germoplasma y variedades mejoradas. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 5(2), 151-166. Recuperado en 13 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722008000200003&lng=es&tlng=es.

- Márquez-Vasallo, Yarisyen, Salomón-Díaz, Jorge Luis, & Acosta-Roca, Rosa. (2020). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales*, 41(1), . Epub 01 de marzo de 2020. Recuperado en 05 de marzo de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000100010&lng=es&tlng=es.
- Mederos-Ramírez, A., & Ortiz-Pérez, R. (2021). Análisis de la interacción genotipo-ambiente en el cultivo de la soya (*Glycine max* (L.) Merrill). *Cultrop*, 42(1), 1-10.
- Mederos-Ramírez, Alejandro, & Ortiz-Pérez, Rodobaldo. (2021). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la soya (*Glycine max* (L) Merrill). *Cultivos Tropicales*, 42(1),. Epub 30 de marzo de 2021.
- Miranda, G. V., Guimaraes, L. J. M., Souza, L. V., Souza, H. N., & Otros. (2009). Análisis multivariados de la interacción genotipo x ambiente. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(1), 45-50.
- Mohammadi, M., T. Hosseinpour, M. Armion, H. Khanzadeh, and H. Ghojogh. (2016). Analysis of genotype, environment and genotype x environment interaction in bread wheat genotypes using gge biplot. *Agri. Commun.* 4(3):1-8.
- Nigus, A., & Bekana, G. (2021). Análisis de la interacción genotipo x ambiente y estabilidad para el rendimiento de grano de genotipos avanzados de tef utilizando biplots GGE. *Revista de Biología*, 21(10), 1-10.
- Nzuve, F., Githiri, S., Mukunya, D. M., & Gethi, J. (2013). Análisis de la interacción genotipo x ambiente para el rendimiento de grano en híbridos de maíz. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 5(11), 75-84.
- Olivoto T., Lúcio AD, Da Silva JA, Sari BG, Diel MI, (2019b). Rendimiento medio y estabilidad en ensayos multiambientales II: Selección basada en caracteres múltiples. *Revista de Agronomía*, 111, 2961-2969.

- Olivoto T., Nardino M., (2021). MGIDI: Hacia una selección multivariante efectiva en experimentos biológicos. *Bioinformática*, 37, 1383-1389.
- Pour-Aboughadareh A., Barati A., Gholipoor A., Zali H., Marzooghian A., Koohkan SA, Shahbazi-Homonloo K., Houseinpour A., (2023). Descifrando la interacción genotipo-ambiente en genotipos de cebada utilizando diferentes métodos de adaptabilidad y estabilidad. *Revista de ciencia y biotecnología de cultivos*, 1-16.
- Resende MDV, Thompson R. Modelos mixtos multiplicativos analíticos factoriales en el análisis de experimentos múltiples. *Rev Matemáticas y Estadísticas*. (2004); 22:31–52.
- Rincón SF, Castillo GF, Ruiz TNA (2010). Diversidad y distribución de los maíces nativos en Coahuila, México. SOMEFI. Chapingo, México. 116p.
- SIAP-SADER. (2024). *Expectativas agroalimentarias 2024*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/index.php/s/1aZhz46xIIMxPD>
- Singamsetti A., Zaidi PH, Seetharam K., Vinayan MT, Olivoto T., Mahato A., Madankar K., Kumar M., Shikha K., (2023). Ganancias genéticas en híbridos de maíz tropical en todos los regímenes de humedad con selección de índices basada en múltiples rasgos. *Fronteras en la ciencia vegetal*, 14.
- Tonk, F.A., E. Ilker, and M. Tosun. (2011). Evaluation of genotype x environment interactions in maize hybrids using GGE biplot analysis. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 11:1-9.
- Torres, F. J. L.; Morales, R. E. J.; González, H. A.; Laguna, C. A. y Córdova, O. H. (2011). Respuesta de híbridos trilineales y probadores de maíz en valles altos del centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(6):829-844.
- Turrent, F. A. (2009). Potencial productivo de maíz. *Rev. Cienc.* 92(93):126-129.

- Van Eeuwijk FA, Bustos-Korts DV, Malosetti M. ¿Qué deben saber los estudiantes de fitomejoramiento sobre los aspectos estadísticos del genotipo?× ¿Interacciones ambientales? *Ciencia de los cultivos*. (2016); 56(5):2119–40.
- Vieira, R. A., Scapim, C. A., Moterle, L. M., Tessmann, D. J., Teixeira, A. A., & Goncalves, L. S. A. (2012). The breeding possibilities and genetic parameters of maize resistance to foliar diseases. *Euphytica*, 185, 325-336.
- Weather Spark. (2021). Datos históricos meteorológicos de 2021 en Torreón, México. Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/h/y/3986/2021/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2021-en-Torre%C3%B3n-M%C3%A9xico>.
- Yan W. Análisis y manejo de G×Y en un Programa de Crianza Práctico. *Ciencia de los cultivos*. (2016); 56(5):2106– 18.
- Yan W., Hunt L., (2001). Interpretación de la interacción genotipo× ambiente para el rendimiento del trigo de invierno en Ontario. *Ciencia de los cultivos*, 41, 19-25.
- Yan, W ., L.A. Hunt, Q. Sheng, and Z. Szlavnic. (2000). Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci*. 40:597-605.
- Yanai, I. (2013). Los determinantes genómicos de las interacciones genotipo X-ambiente en la expresión génica. *Tendencias en Genética*, 29(6), 289-290.