

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



INTERACCIÓN GENOTIPO – AMBIENTE DE HÍBRIDOS SUBTROPICALES  
DE MAÍZ PARA EL NORTE DE TAMAULIPAS, MÉXICO

Tesis

Que presenta GLORIA ANGÉLICA PRIETO HUÍZAR  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



INTERACCIÓN GENOTIPO – AMBIENTE DE HÍBRIDOS SUBTROPICALES  
DE MAÍZ PARA EL NORTE DE TAMAULIPAS, MÉXICO

Tesis

Que presenta GLORIA ANGÉLICA PRIETO HUÍZAR  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

Dr. Fernando Borrego Escalante  
Director

Dr. J Santos González Ledesma  
Co-Director Externo

Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2024

INTERACCIÓN GENOTIPO – AMBIENTE DE HÍBRIDOS SUBTROPICALES  
DE MAÍZ PARA EL NORTE DE TAMAULIPAS, MÉXICO

Tesis

Elaborada por GLORIA ANGÉLICA PRIETO HUÍZAR como requisito parcial  
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Fitomejoramiento con la  
supervisión y aprobación del Comité de Asesoría

Dr. Fernando Borrego Escalante  
Director

Dr. J Santos González Ledesma  
Asesor

Dra. Norma Angélica Ruiz Torres  
Asesor

Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez  
Asesor

Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2024.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, a la virgencita y al espíritu santo gracias por permitirme terminar este proyecto.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por abrirme las puertas nuevamente a través del departamento de **Fitomejoramiento** durante mi estadía y a la **Subdirección de Postgrado** por haberme apoyado económicamente durante la estancia académica realizada en el estado de Tamaulipas y la participación en el congreso de la SOMEFI.

Al **CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología)** por haberme otorgado el apoyo económico para realizar mis estudios.

A la empresa **CORTEVA AGRISCIENCE S. A de C.V** por haberme permitido realizar esta investigación para obtener el grado académico de M.C.

A mi comité de asesoría conformado por el **Dr. J Santos González Ledesma**, gracias por darme la oportunidad de trabajar con usted, por la experiencia compartida y por sus consejos, **al Dr. Fernando Borrego Escalante**, por sus frases motivacionales ¡Échale, ganas!, a **la Dra. Norma Angélica Ruíz Torres** por su eficiencia, y, **al Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez** por el tiempo extra que me dedico, su orientación y su eficiencia, gracias a todos.

Al **Dr. Froylán Rincón Sánchez**, por su colaboración y por haberme invitado a formar parte de su grupo élite, gracias.

A mis maestros al **Dr. José Espinoza Velásquez, Dr. Manuel Humberto Reyes Valdés, Dr. Joel Ventura Velasco y Dr. Arturo Mancera Rico.**

Al **M.C Eduardo Hernández Alonso** y al **Ing. Raúl Gándara Huitrón** por la experiencia compartida y su apoyo. A mis **amigos y compañeros** que pasamos momentos agradables. A la **M. C Cristina Patricia Aguilar Aranda** y a la **Ing. Ma. De Lourdes Hernández Hernández** por su amabilidad y apoyo.

## DEDICATORIA

A **Dios, a la virgencita y al espíritu Santo**, por permitirme culminar este nuevo logro académico, pero sobre todo gracias por permitir que mi familia lo pueda ver.

A **mi familia**, que es lo más importante y la que me ha apoyado incondicionalmente, a mi padre **Elías Prieto Prieto**, gracias por ser ese pilar que siempre me ha apoyado y hacerme saber que como tú hija soy importante para tí, al complemento de ese pilar mis madres **Ma. Joaquina Huízar Hernández y Ma. Del Rosario Prieto Prieto**, por su motivación, su imploración a Dios por mí y por estar siempre al pendiente a pesar de la distancia que nos separa. A mis hermanas (Ing. **Guadalupe Silvia Alicia Prieto Huízar** y Dra. **Eva Esperanza Prieto Huízar**), a mis sobrinitas (**Lucia Ahinara Rodríguez Prieto** y **Elisa Abigail Carranza Prieto**) y a sus **papás** (**Carlos y Daniel**) por sus consejos y motivaciones por ser esas personitas que estuvieron presentes día a día.

A mis **abuelos** que Dios los tenga en su gloria, les dé un eterno descanso y gocen de su presencia en el cielo, alcanzando la vida eterna † **Ma. Del Refugio Prieto Sandoval** te sigo queriendo abuela, †**Casimiro Prieto Sandoval**, †**Ma. Higinia Hernández Jáuregui** y †**Gabino Huízar Ramírez**.

A mis **tíos** a los cuales aprecio mucho **Simeón Prieto Prieto, Ma. Eusebia Prieto Prieto, Teodoro Huízar Hernández y Ma. Rosa Huízar Hernández, José Gemo Prieto Prieto**, a la **familia Huízar** y a los **Prieto** a esos que siempre han estado presentes.

Agradecida con el †**Dr. Humberto de León Castillo** (que le conceda Dios el eterno descanso y goce de la presencia de Dios), **Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo, Dr. J Santos González Ledesma**, mi hermana **Lupita** y al que dio inicio a un nuevo comienzo **J. Guadalupe González Ledesma** (tío Lupe), gracias a Dios y a ustedes por haberme dado esa magnífica oportunidad que he sabido aprovechar.

A la familia **Ruíz Moreno** por su apoyo incondicional, muchas gracias.

**¡Siempre hay que tratar de ser mejores cada día y no quedarse con lo mismo!**

Francisco Javier Sánchez Ramírez

## ÍNDICE GENERAL

<b>APROBACIÓN DE TESIS.....</b>	ii
<b>LISTA DE CUADROS .....</b>	vi
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	ix
<b>RESUMEN.....</b>	x
<b>ABSTRACT .....</b>	;Error! Marcador no definido.
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	1
Objetivos .....	3
Hipótesis.....	3
<b>REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	4
Importancia del maíz en México.....	4
Producción de maíz en Tamaulipas.....	4
Limitantes para la producción de maíz en la zona norte de Tamaulipas .....	5
Híbridos.....	5
Interacción genotipo-ambiente.....	6
Altas temperaturas en la fisiología del maíz .....	7
Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) .....	7
Índice de selección .....	8
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	10
Material genético.....	10
Descripción de los ambientes de evaluación.....	10
Diseño experimental.....	11
Labores culturales .....	11
Preparación del terreno .....	12
Siembra .....	12
Fertilización.....	13
Riegos.....	13
Control de malezas.....	13
Cosecha .....	14
Análisis de la información .....	16
Estudio de la interacción genotipo – ambiente .....	17
Índice de selección .....	17

<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>20</b>
Análisis de varianza .....	20
Medias de las variables agronómicas evaluadas en la zona norte de Tamaulipas .....	22
Interacción genotipos x caracteres a través de las localidades de evaluación.....	27
Rendimiento promedio y estabilidad de los genotipos evaluados a través de los ambientes .....	31
Interacción genotipo x ambiente para rendimiento de grano .....	34
Selección de genotipos mediante el índice de selección .....	37
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Genotipos de maíz involucrados en el estudio durante el período de febrero-julio de 2023.....	10
<b>Cuadro 2.</b> Características climáticas de las localidades de estudio. ....	10
<b>Cuadro 3.</b> Datos climáticos mensuales de las localidades durante el ciclo de evaluación I-V 2023.....	11
<b>Cuadro 4.</b> Fechas de siembra a través de las localidades de evaluación I-V 2023.....	12
<b>Cuadro 5.</b> Metas e intensidades propuestas para el índice de selección de caracteres agronómicos.....	18
<b>Cuadro 6.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza de variables agronómicas de 18 genotipos evaluados en la zona Norte de Tamaulipas en el 2023 I-V.....	21
<b>Cuadro 7.</b> Medias de las variables agronómicas evaluadas x ambiente de siete localidades en la zona Norte de Tamaulipas en 2023.....	24
<b>Cuadro 8.</b> Índice de selección de las variables evaluadas en el Norte de Tamaulipas 2023.....	37

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Dispersión gráfica de la variación de 18 genotipos con respecto a los caracteres evaluados en los ambientes.....	29
<b>Figura 2.</b> Rendimiento y estabilidad de los genotipos evaluados a través de los ambientes. ....	<b>ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>Figura 3.</b> Interacción genotipo x ambiente en rendimiento de semilla .....	<b>ERROR!</b> <b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## **RESUMEN**

**INTERACCIÓN GENOTIPO – AMBIENTE DE HÍBRIDOS SUBTROPICALES  
DE MAÍZ PARA EL NORTE DE TAMAULIPAS, MÉXICO**

**POR**

**GLORIA ANGÉLICA PRIETO HUÍZAR  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DR. FERNANDO BORREGO ESCALANTE  
DIRECTOR**

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2024

En los programas de mejoramiento genético es un gran reto para los mejoradores incrementar la ganancia genética en los cultivos, y a la vez seleccionar genotipos (híbridos) estables para diferentes ambientes. Actualmente es prioridad crear genotipos, capaces de tolerar condiciones climáticas adversas, y que respondan favorablemente en cuanto a rendimiento, calidad de la semilla y características agronómicas favorables. Dado esta problemática, se planteó evaluar y seleccionar genotipos experimentales para el Norte de Tamaulipas en combinación con genética de diferente origen del Centro de México, Sinaloa y Tamaulipas; así, como seleccionar los mejores genotipos, que presenten mayor rendimiento y estabilidad con el propósito de optimizar la producción agrícola y beneficiar a los agricultores de la región. Se evaluaron 15 híbridos experimentales y tres testigos comerciales de maíz amarillo subtropical, en 15 ambientes diferentes en el Norte de Tamaulipas, México. Evaluados bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. El análisis de varianza mostró diferencias significativas en el efecto de interacción genotipo-ambiente (IGA) ( $P \leq 0.01$ ) para la variable rendimiento de semilla. Para la interacción genotipo-ambiente, se realizó un análisis de dispersión gráfica usando el modelo aditivo e interacción multiplicativa (AMMI) y su gráfico biplot para identificar la estabilidad y rendimiento de los genotipos, el gráfico explicó el 66.95 % de la interacción. Los genotipos de Tamaulipas son los que mejor se adaptan a las condiciones ambientales de la zona. Se identificaron dos genotipos (8Tam y 12Tam) con potencial de rendimiento y estabilidad, superando a los testigos comerciales con un 0.5 % y 0.26 %; además el genotipo 3Sin presenta buen potencial de rendimiento. Los ambientes contrastantes que permiten discriminar a los genotipos son Río Bravo y Gustavo Díaz Ordaz, Tamaulipas.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., rendimiento, estabilidad, modelo de interacción de efectos aditivos e interacción multiplicativa y manejo agronómico.

**ABSTRACT**

GENOTYPE – ENVIRONMENT INTERACTION OF SUBTROPICAL MAIZE  
HYBRIDS FOR NORTHERN TAMAULIPAS, MEXICO

BY

GLORIA ANGÉLICA PRIETO HUÍZAR  
MAESTRIA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. FERNANDO BORREGO ESCALANTE  
ADVISOR

Saltillo, Coahuila

December 2024

In breeding programs, it is a significant challenge for breeders to increase genetic gain in crops while simultaneously selecting stable genotypes (hybrids) for different environments. Currently, it is a priority to develop genotypes tolerating to adverse climatic conditions and responding favorably in terms of yield, seed quality, and advantageous agronomic traits. To address this issue, we proposed to evaluate and select experimental genotypes for Northern Tamaulipas in combination with genetics from different origins, including Central Mexico, Sinaloa, and Tamaulipas. This study aimed to identify the best-performing and most stable genotypes to optimize agricultural production and benefit regional farmers. Fifteen experimental hybrids and three commercial control of subtropical yellow maize were evaluated across 15 environments in Northern Tamaulipas, Mexico, using a randomized complete block design with three replications. The analysis of variance revealed significant differences in the genotype-environment interaction effect (GEI) ( $P \leq 0.01$ ) for the seed yield variable. For the genotype-environment interaction, a graphical dispersion analysis was performed using the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model and its biplot graphic to identify the stability and performance of the genotypes, the graphic explaining 66.95% of the interaction. The genotypes from Tamaulipas were the most adapted to the environmental conditions of the region. Two genotypes (8Tam and 12Tam) were identified with high yield and stability potential, surpassing the commercial controls by 0.5% and 0.26%, respectively. Additionally, the genotype 3Sin showed outstanding yield potential. The contrasting environments that allowed effective discrimination of genotypes were Río Bravo and Gustavo Díaz Ordaz, Tamaulipas state.

**Keywords:** *Zea mays* L., yield, stability, additive main effects and multiplicative interaction model, agronomic management.

## INTRODUCCIÓN

El estado de Tamaulipas no es tradicionalmente conocido por el cultivo de maíz blanco; sin embargo, es uno de los principales productores de maíz amarillo en México. Este éxito se debe principalmente a que presenta mayor adaptabilidad a condiciones climáticas adversas, resistencia a plagas y enfermedades que afectan al maíz blanco, a la demanda del mercado internacional, al apoyo gubernamental, acceso a condiciones de riego, lo que le permite mitigar las adversas condiciones climáticas y de suelo, características favorables para soportar las temperaturas que predominan en la región. Esto favorece un rendimiento estable y competitivo en comparación con otros estados del país, además de ser aprovechable en la ganadería y atractivo para los agricultores de la zona (SADER, 2023). Durante el año agrícola 2023, las siembras de maíz amarillo en México alcanzaron una producción de 3,203,368.74 ha, de las cuales, en Tamaulipas, se cosechó 40,159.46 ha, con un valor de la producción de 1,222,876.84 de miles de pesos. Además, la producción cosechada de maíz blanco a nivel nacional fue de 5,890,126.20 ha, con 54,791.15 ha en Tamaulipas. En condiciones de riego, se cultivaron 36,312.46 ha de maíz amarillo y 3,847.00 ha bajo condiciones de temporal, con un rendimiento promedio de 6.59 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2023).

El norte de Tamaulipas presenta un clima BW principalmente, que representa un desafío considerable para la agricultura que influye significativamente en el rendimiento de la semilla en maíz, por lo que se pretende buscar genotipos (híbridos) que sean capaces de soportar características ambientales específicas de la región, dada la adversidad climática que se presenta. Se busca que los nuevos genotipos difieran en origen genético, capaces de sobresalir en altos rendimientos para la producción de grano. El mejoramiento de cultivos en esta región es complejo debido a la limitada disponibilidad de agua y la necesidad de seleccionar híbridos que sean estables bajo estas condiciones (González *et al.*, 2024).

La interacción genotipo-ambiente ocurre cuando los genotipos responden de manera diferente a las condiciones climáticas en diversos ambientes, lo que se refleja en el fenotipo. Por otro lado, la estabilidad de los genotipos se observa cuando tienen la capacidad de presentar un comportamiento predecible y no sufren grandes fluctuaciones

en su rendimiento, y es evaluada en términos de su interacción con diferentes ambientes. Es decir, los genotipos muestran poca variación en su rendimiento en una amplia gama de condiciones. Por interacción se entiende cómo los genotipos responden a cambios en su entorno (Mederos & Ortiz, 2021). Por esta razón, es fundamental desarrollar genotipos no solo de alto rendimiento, sino también estables en diversos ambientes, para obtener resultados predecibles. Por lo tanto, se recomienda evaluar múltiples genotipos (experimentales y comerciales) en diferentes ambientes y a lo largo de varios años, para poder identificar aquellos que presenten estabilidad.

En el estudio de la interacción genotipo-ambiente, los modelos más utilizados son el AMMI (Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa) y el SREG (Sitios de Regresión) (Bandera, 2023). El modelo AMMI combina el análisis de varianza con el análisis de componentes principales, donde el genotipo y el ambiente son considerados efectos aditivos, mientras que la interacción genotipo-ambiente es multiplicativa. Este modelo permite una mejor interpretación de la estabilidad y el comportamiento de los genotipos, así como de la influencia de los ambientes, a través del análisis de dispersión gráfica (Ponce *et al.*, 2022).

Dado lo anterior, la empresa Corteva Agriscience S.A de C.V, a través de sus programas de mejoramiento genético, está comprometida con el desarrollo de genotipos para los productores, que cumplan con características deseables como alto rendimiento, bajo contenido de humedad, uniformidad en características como altura de la planta y mazorca, días a la floración masculina y femenina y otros atributos agronómicos como el número de hileras, longitud y diámetro de la mazorca. Así, se busca seleccionar materiales que sean productivos, estables y adaptables a diferentes ambientes, con un alto potencial de rendimiento (J González, comunicación personal, 15 de julio de 2023). Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar y seleccionar híbridos experimentales para el norte de Tamaulipas, en combinaciones genéticas de diferente origen, bajo la hipótesis de que la combinación de germoplasma local con germoplasma foráneo puede ser una alternativa viable para identificar híbridos con potencial para esta región.

**Objetivos**

- 1) Evaluar y seleccionar híbridos experimentales para el Norte de Tamaulipas en combinaciones genéticas de diferente origen ecológico.
- 2) Seleccionar los mejores híbridos a través del rendimiento de semilla y estabilidad con el propósito de optimizar la producción agrícola.

**Hipótesis**

Es posible que la combinación de germoplasma local x foráneo puede ser una alternativa para generar y seleccionar híbridos experimentales con potencial para mayor rendimiento y estabilidad para el Norte de Tamaulipas.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Importancia del maíz en México

El maíz es uno de los cultivos más importantes en México debido a su capacidad de adaptación y amplia distribución en todo el territorio nacional. Además, el maíz es un elemento central en la identidad cultural mexicana, simbolizando nuestras raíces y tradiciones (SADER, 2020).

En México, la alimentación de la población se basa principalmente en el consumo de maíz blanco, con una demanda de 18.626 millones de toneladas (Mt). En contraste, el maíz amarillo se destina mayoritariamente a la industria y al consumo animal, con solo 2.988 Mt destinados al consumo humano, lo que da un total de 21.614 Mt para consumo humano. El consumo de maíz amarillo para alimentación animal asciende a 19.824 Mt, mientras que la producción nacional de este grano es de solo 3.183 Mt, resultando en un déficit de 16.641 Mt. Los principales estados productores de maíz amarillo son Chihuahua, Tamaulipas y Jalisco (SIAP, 2023).

### Producción de maíz en Tamaulipas

En el norte del estado de Tamaulipas es donde se concentra la mayor parte de siembra de maíz con semilla híbrida; sin embargo, en la parte sur y centro del estado corresponde principalmente a la siembra de semilla nativa (González *et al.*, 2023). En el estado la superficie sembrada es de 114.808,69 ha, de las cuales el 63.07 % corresponde a maíz blanco y el 36.93 % a maíz amarillo. En condiciones de riego, se cultivan 69,539.16 ha, mientras que, en condiciones de temporal se siembran 45,269.53 ha (SIAP, 2023).

El cultivo de maíz en Tamaulipas se realiza bajo dos modalidades: riego y temporal. Bajo riego los municipios con mayor rendimiento son, Gustavo Díaz Ordaz ( $7.53 \text{ udm ha}^{-1}$ ), Reynosa ( $7.32 \text{ udm ha}^{-1}$ ) y Camargo ( $7.26 \text{ udm ha}^{-1}$ ), y bajo temporal Matamoros ( $5.04 \text{ udm ha}^{-1}$ ), Río Bravo ( $4.20 \text{ udm ha}^{-1}$ ) y González ( $2.95 \text{ udm ha}^{-1}$ ), durante los ciclos agrícolas de primavera-verano y otoño-invierno. Las tecnologías agrícolas implementadas, especialmente en áreas de riego, varían según las prácticas de los productores y las características agroecológicas de la región. Las áreas bajo riego, donde se concentra la mayor parte de la producción, cuentan con tecnologías más especializadas y están dominadas por productores con mayor impacto social (SADER, 2023).

### **Limitantes para la producción de maíz en la zona norte de Tamaulipas**

La zona norte de Tamaulipas se caracteriza por presencia de enfermedades fitopatológicas que afectan la sanidad de las semillas, lo cual impacta negativamente en el rendimiento de los cultivos. Este fenómeno está asociado a las altas temperaturas y a condiciones que favorecen inicialmente el crecimiento del cultivo. Sin embargo, en época invernal las temperaturas descienden y se presentan días nublados, donde el crecimiento de la planta es poco, y en época seca el crecimiento es nulo; aunando a estas condiciones, es una zona relevante en la producción de grano (Garay *et al.*, 2024). Las enfermedades fitopatológicas se pueden disminuir por medio del manejo agronómico.

Tamaulipas es un estado que presenta un limitado acceso al agua de riego, lo que representa suelos con poca humedad y temperaturas extremas, que tienen como consecuencia presencia de aflatoxinas y pudrición en la mazorca después de la polinización, ambos factores se asocian con aquellos híbridos que están sometidos a condiciones de estrés por sequía (Odjo *et al.*, 2022).

Debido a estos problemas a los que se enfrenta el estado de Tamaulipas como es la sequía, suelos infértilles, enfermedades y germoplasma susceptible, causando un bajo rendimiento, calidad y sanidad en la semilla, es necesario identificar genotipos con alto potencial de rendimiento y calidad de semilla para la zona (Godina *et al.*, 2020).

El rendimiento y la estabilidad de los híbridos, se ve afectada por las temperaturas altas causadas por la falta de lluvia y el estrés por calor, lo que representa hasta un 11.7% de bajo rendimiento de semilla, cuando las condiciones de calor se presentan en la etapa de floración en la planta (Li *et al.*, 2023).

### **Híbridos**

Los híbridos se generan a partir de cruzamientos dirigidos de líneas endogámicas, durante varios ciclos de autopolinización y con caracteres definidos; tras varios ciclos de selección, los híbridos dobles surgen de la crusa entre dos híbridos simples, es decir, entre las progenies de las líneas puras (A x B) x (C x D). Por otro lado, los híbridos triples resultan de la crusa entre un híbrido simple y una línea pura (A x B) x C). Finalmente, un híbrido simple es el producto de la crusa entre dos líneas puras (A x B). Además, los

híbridos simples son los que expresan mayor potencial de rendimiento (Saravia, 2024), aunque por su reducida variabilidad genética, puede presentar mayor susceptibilidad ambiental.

La hibridación es un método de mejoramiento genético ampliamente utilizado en la actualidad para desarrollar semillas híbridas. Este proceso consiste en cruzar un progenitor macho y un progenitor hembra, ambos provenientes de poblaciones con una base genética amplia, pertenecientes a dos grupos heteróticos. La efectividad del método depende de la capacidad del mejorador para seleccionar genes específicos que se fijan en cada generación dentro de cada población (García *et al.*, 2020).

El método de hibridación fue propuesto originalmente por Shull (1908). Aunque este enfoque de mejoramiento genético implica un costo elevado en la producción de híbridos, ofrece la ventaja de un alto grado de heterosis tras varios ciclos de selección, en contraste con la selección asistida por marcadores moleculares, que permite avanzar los ciclos de selección del híbrido con una mayor probabilidad de éxito, permite maximizar la posibilidad de un mayor éxito al encontrar los genes que se desean por medio de la predicción, con base al rendimiento (Nyaga *et al.*, 2020).

### **Interacción genotipo-ambiente**

La interacción genotipo-ambiente sucede cuando existen diferencias significativas en el comportamiento de los genotipos, evaluados en diferentes ambientes. Los genotipos representan al conjunto de genes que regulan la expresión fenotípica de un carácter específico, deben de ser uniformes en los distintos ambientes de evaluación, mientras que el ambiente es el conjunto de factores no genéticos (climáticos) que influyen en la expresión de un carácter. En un trabajo de investigación realizado con 75 híbridos de maíz, en seis ambientes diferentes, bajo condiciones de temporal y diferentes humedades, se pudo seleccionar genotipos estables dentro de ambientes diferentes a través del estudio de la interacción genotipo-ambiente (Singamsetti *et al.*, 2021).

Los híbridos que obtienen un alto rendimiento en condiciones favorables son los que muestran una adaptación con el ambiente, presentando una menor interacción genotipo-ambiente y son comúnmente utilizados para la producción de semilla híbrida, son los

híbridos triples; sin embargo, algunos productores han observado que son los simples. Aunque tienen un mayor costo de producción en contrate con los híbridos dobles y triples (Cieza *et al.*, 2020).

Las variedades que provienen de una polinización libre son más estables y muestran una mejor capacidad de adaptación, en contraste con aquellos híbridos que provienen de una reducida base genética. Esto depende de las condiciones climatológicas propias de la zona; dada esta circunstancia, el rendimiento es inestable entre genotipos. Sin embargo, a través de los años se han ido acumulando alelos favorables en cada ciclo de selección, donde los híbridos han demostrado una buena adaptación a las condiciones ambientales (Guamán *et al.*, 2020).

### **Altas temperaturas en la fisiología del maíz**

Las temperaturas mayores a 30 °C repercuten de manera negativa en el rendimiento del cultivo del maíz, esto ocurre si se presentan en la etapa de floración debido a que disminuye la actividad fotosintética e inhibe la polinización. Las temperaturas altas tienden a intensificar las condiciones del estrés hídrico y en consecuencia aumenta la transpiración; dada esta situación las plantas tienden a cerrar los estomas para reducir la pérdida de agua, reduciendo la asimilación de CO<sub>2</sub> (Pionner, 2022).

La temperatura foliar aumenta con la radiación solar, alterando el balance energético y reduciendo la eficiencia fotosintética por el aumento de la fotorrespiración. Esto afecta procesos clave, como la conductancia en los estomas, temperatura y transpiración en las hojas y reducen el crecimiento, principalmente en plantas C3 (Zavala *et al.*, 2022).

Las temperaturas elevadas afectan significativamente el desarrollo radical del maíz, ya que disminuyen la capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo que impacta negativamente el crecimiento y rendimiento de la planta. Esto se debe a que el estrés térmico induce alteraciones en la fisiología de las raíces, afectando su morfología y funcionalidad (Zhang *et al.*, 2023).

### **Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI)**

Bruno & Balzarini (2021) mencionan que el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) es el más utilizado para estudiar la interacción genotipo-ambiente, donde contrasta ilustraciones con datos completos e incompletos de

la interacción (GEE), encontrando resultados similares, no obstante, considera que los datos incompletos mediante un modelo mixto, también es viable.

El AMMI y su biplot, son esenciales para identificar genotipos estables y evaluar la variabilidad genética entre ellos, lo cual es crucial para alcanzar un rendimiento adecuado. La floración es la variable más influenciada por el ambiente, pero la característica de mayor importancia es el rendimiento de la semilla (Mederos & Ortiz, 2021).

En la interpretación de la variación en el modelo AMMI, investigaciones recientes destacan cómo los gráficos de componentes principales (APC) y GGE biplot, pueden ayudar a visualizar sólo una fracción de la variación total en un conjunto de datos (Alhassan *et al.*, 2021).

Los modelos AMMI (expresa la IGA en cuanto a rendimiento y permite eliminar genotipos) y la SREG (Regresión de los sitios) clasifican los mejores ambientes de evaluación. Ambos se complementan, lo que permite una interpretación más clara a través de los gráficos biplot. En un estudio se realizó una investigación con 35 híbridos de maíz amarillo duro, híbridos dobles y triples, los híbridos triples resultaron ser más estables y con mayor adaptación (Ponce *et al.*, 2022).

El modelo de AMMI utiliza el análisis de varianza aunado con componentes principales, con la suma de cuadrados, basado en el modelo lineal-bilineal. Se considera lineal al genotipo y el ambiente, y bilineal a la interacción del genotipo por el ambiente. A esta interacción se le analizó en maíz amiláceo mediante componentes principales, en un estudio en el que identificaron a los genotipos superiores en relación a los valores medios en cada ambiente, mediante un análisis de varianza mostraron los valores de significancia en los genotipos y el ambiente (García *et al.*, 2021).

## Índice de selección

El índice de selección (IS) va de acuerdo, con los valores propuestos en las metas e intensidades, relacionado con los caracteres de mayor importancia, por lo tanto Barreto en (1991), recomienda utilizarlo, para obtener un balance en el potencial del valor genético de una población, seleccionando y evaluando genotipos que estén relacionados con características deseables para el mejorador, por ejemplo, el rendimiento, el acame y la

tolerancia a plagas y enfermedades, mejorando varias características simultáneamente, manteniendo un equilibrio en ambas características (Rodríguez *et al.*, 2023).

De acuerdo con el trabajo que realizaron Ibarra (*et al.*, 2020), se menciona que el estrés por sequía es el factor principal que afecta en el rendimiento de grano en maíz, bajo condiciones de temporal. Con el objetivo de seleccionar líneas tolerantes a sequía, se consideró el comportamiento agronómico, aunado al rendimiento de los ambientes, bajo los índices de selección de tolerancia y susceptibilidad de los genotipos en condiciones de estrés hídrico. Este índice, enfocado a ciertas características de mayor interés y de acuerdo a los objetivos propuestos, permite identificar genotipos que mantienen un balance entre los caracteres seleccionados y los valores propuestos, enfocados a un rendimiento estable y elevado, aún en ambientes con déficit de humedad, lo cual es fundamental para desarrollar híbridos de maíz adaptados a condiciones de temporal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### **Material genético**

El material genético que se evaluó en la presente investigación son 15 genotipos de maíz en etapa precomercial propiedad de la empresa Corteva Agriscience S.A de C.V. Con genética de Sinaloa, Centro de México y Tamaulipas. Además, se utilizaron tres genotipos comerciales como testigos con genética de Tamaulipas 1, 6 y 17 (Cuadro 1.).

**Cuadro 1.** Genotipos de maíz evaluados en el estudio durante el período de febrero-julio de 2023.

GENOTIPO †	ORIGEN	GENOTIPO †	ORIGEN
1*	Tamaulipas	10	Sinaloa
2	Centro de México	11	Tamaulipas
3	Sinaloa	12	Tamaulipas
4	Centro de México	13	Tamaulipas
5	Tamaulipas	14	Tamaulipas
6*	Tamaulipas	15	Sinaloa
7	Sinaloa	16	Centro de México
8	Tamaulipas	17*	Tamaulipas
9	Sinaloa	18	Sinaloa

†=Genotipos; \*=Testigos; obtenidos de la empresa CORTEVA Agriscience S.A de C.V.

### **Descripción de los ambientes de evaluación**

La evaluación de los genotipos de maíz se realizó en tres localidades que fueron representativas de las condiciones ambientales y agrícolas de la región norte del estado de Tamaulipas: Camargo, Gustavo Díaz Ordaz y Río Bravo, con un total de 15 ambientes evaluados.

**Cuadro 2.** Características climáticas de las localidades de estudio.

LOCALIDADES	ALTITUD (msnm)	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)
<b>Camargo</b>	68	600	25
<b>Gustavo Díaz Ordaz</b>	68	450	24
<b>Río Bravo</b>	25	650	22

Fuente: CONAGUA (2023).

En el Cuadro 3, se pueden observar las temperaturas reportadas en las localidades de evaluación, a medida que fueron transcurriendo los días las temperaturas aumentaron gradualmente. Los datos climáticos mensuales muestran las temperaturas máximas y mínimas de las tres localidades de evaluación (Camargo, Gustavo Díaz Ordaz y Río Bravo), durante el ciclo agrícola I-V 2023.

**Cuadro 3.** Datos climáticos mensuales de las localidades durante el ciclo de evaluación I-V 2023.

DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA	LOCALIDADES	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	MEDIA
<b>Temperatura</b>									
<b>Máxima (°C)</b>	Camargo	26	26	29	29	32	37	39	31
	Gustavo Díaz Ordaz	26	26	29	29	32	38	38	31
	Río Bravo	25	25	28	28	31	37	37	30
<b>Temperatura</b>									
<b>Mínima (°C)</b>	Camargo	14	14	18	19	23	25	26	20
	Gustavo Díaz Ordaz	14	14	18	19	23	25	26	20
	Río Bravo	13	13	18	19	22	25	26	19

Fuente: CONAGUA (2023).

### Diseño experimental

En campo la evaluación se estableció en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente dentro de localidades; surcos de 4 metros de largo, 0.80 metros de espacio entre surcos, con 30 plantas a una distancia de 0.13 metros entre planta y planta, con una densidad de planta de 96,000 por hectárea.

El área de parcela útil (APU) fue determinada mediante la distancia entre rangos (surcos) por el largo del surco (4 m x 0.80 m); 100/80, coeficiente para determinar el rendimiento al 12 % del contenido de humedad en el grano; 1,000 valor constante utilizado para calcular el rendimiento en t ha<sup>-1</sup>; 10,000, superficie respecto a una hectárea en m<sup>2</sup>.

### Labores culturales

El manejo agronómico del cultivo fue realizado acorde a sus necesidades en cada ambiente de estudio y de acuerdo a las condiciones del agricultor.

## Preparación del terreno

Previo a la fecha de siembra, en los ambientes se realizaron dos subsuelos y en algunos, sólo uno; posteriormente algunos agricultores aplicaron un paso de rastra.

## Siembra

Cada fecha de siembra en las localidades se consideró como un ambiente, fueron 14 fechas de siembra diferentes en los ambientes de evaluación. Con el programa Breeder Desktop se realizaron las aleatorizaciones de las unidades experimentales del ensayo en campo (Cuadro 4.).

**Cuadro 3.** Fechas de siembra a través de las localidades de evaluación I-V 2023.

NO.	COORDENADAS	LOCALIDADES	AMBIENTES	FECHAS DE SIEMBRA
1	26.17072°N, 98.52322°O	Gustavo Díaz Ordaz	El Refugio	26-ene-23
2	26.19325°N, 98.58771°O	Gustavo Díaz Ordaz	El barrote	30-ene-23
3	26.17143°N, 98.48833°O	Gustavo Díaz Ordaz	Reynosa-Díaz	31-ene-23
4	26.18016°N, 98.57484°O	Gustavo Díaz Ordaz	Las palmas 111 con 7	04-feb-23
5	25.81352°N, 98.09820°O	Río Bravo	Norte 109 con 4	07-feb-23
6	25.77697°N, 98.09821°O	Río Bravo	Norte	08-feb-23
7	26.16050°N, 98.40747°O	Gustavo Díaz Ordaz	El Morillo	09-feb-23
8	26.30331°N, 98.80936°O	Camargo	Gonzaleño	23-feb-23
8	26.30269°N, 98.80936°O	Camargo	Gonzaleño2 109 con 4	23-feb-23
9	25.77598°N, 98.09821°O	Río Bravo	Norte2 109 con 14	28-feb-23
10	25.85808°N, 98.09170°O	Gustavo Díaz Río Bravo	Norte	01-mar-23
11	26.17091°N, 98.51247°O	Ordaz	El refugio2	02-mar-23
12	26.17845°N, 98.53013°O	Gustavo Díaz Ordaz	División de Municipios	03-mar-23
13	26.18016°N, 98.57391°O	Gustavo Díaz Ordaz	Las palmas2	04-mar-24
14	26.15943°N, 98.40747°O	Gustavo Díaz Ordaz	El Morillo	05-mar-23

Fuente: CONAGUA (2023).

La ventana de siembra en la zona norte de Tamaulipas comprende del 20 de enero al 20 de febrero; siendo sometidos a un nivel de estrés mayor aquellos genotipos que están fuera de este período, por las altas temperaturas que se presentan en el mes de junio-julio, llegando hasta los 45 °C, aproximadamente. Las localidades que se exponen a mayores condiciones de estrés por las altas temperaturas son 109\_14 Norte, 109\_4 Norte2, El Refugio, División de Municipios, El Morillo y Las Palmas, dado a que están fuera de la ventana de siembra en la zona norte de Tamaulipas.

### **Fertilización**

La fórmula aplicada para las dosis de fertilización en los ambientes de evaluación fue de 11N-52P-00K, con una dosis de 200 kg/ha<sup>-1</sup> antes de la siembra (presiembra); dando una segunda fertilización previo al aporque con la misma dosis en una presentación de granulado. Algunos agricultores utilizaron gas propio que se utiliza en diferente concentración y la fertilización se realizó únicamente en presiembra, siendo diferente para cada ambiente.

### **Riegos**

En todos los sitios (ambientes) seleccionados para la evaluación, el experimento se llevó a cabo bajo condiciones de riego controlado, con tres aplicaciones de riego específicos. El primero se realizó durante la presiembra el 20 de diciembre, conocida entre los agricultores como “riego de asiento”, caracterizado por una lámina de riego abundante. La segunda aplicación tuvo lugar a principios de abril, durante la etapa de floración de las plantas. Finalmente, el tercer y último riego se efectuó a finales de abril y a principios de mayo, durante la fase de llenado de grano. La frecuencia de los riegos se determinó, teniendo en cuenta las características hídricas manifestadas por las plantas, así como las condiciones meteorológicas predominantes en cada uno de los ambientes. Este enfoque riguroso garantizó un ambiente experimental uniforme y óptimo para la observación de los efectos de las variables consideradas.

### **Control de malezas**

En cada ambiente, se aplicó sobre el suelo Peak 400g/ha mezclado con 2-4D 1188 en dosis de un L/ha sin riego, previo al momento de la siembra para plantas de hoja ancha. Para el control de plagas se utilizó el insecticida Palgus para el gusano cogollero (*Spodoptera frungiperda*) y Zierra para el control del gusano elotero (*Helicoverpa zea*) y para la araña

(*Tetranychus urticae*) los productos son de la marca Corteva Agriscience S.A de C.V. En cuanto a las enfermedades no se aplicó ningún producto, se dejó expuesto al cultivo al ataque de enfermedades.

### **Cosecha**

La cosecha se realizó de forma mecánica con la maquina cosechadora combinada con báscula integrada y determinador de humedad que en automático arroja los resultados de cada unidad experimental. En el apartado de rendimiento de semilla se describe.

### **Variables agronómicas de interés**

Con el propósito de mejorar las deficiencias que presenta el cultivo y con la finalidad de entregar a los agricultores un genotipo con las características más cercanas al ideal, se consideraron las siguientes variables de mayor interés. Unidades calor para floración masculina (GDUS\_M); Unidades calor para floración femenina (GDUS\_F); Sanidad de la mazorca (SANIDAD); Tolerancia a calor (TCALOR); Peso de semilla (PSEM); Acame de raíz (ARAIZ) y Humedad de semilla (HUM), representativos en siete ambientes que permitieron discriminar a los genotipos. Rendimiento de semilla (REND) fue tomado en los 15 ambientes.

### **Variables fenológicas**

#### **Unidades calor para floración masculina y femenina (GDUS\_M y GDUS\_F).**

Primero se determinó el umbral de base para el cálculo de las unidades calor utilizando una temperatura base de 10 °C. No obstante, si la temperatura era menor a 10 °C se tomó como base 10 °C, en contraste, si la temperatura era superior a 30 °C se tomó como base 30 °C. Se registraron las temperaturas máximas y mínimas diarias de cada uno de los ambientes. Estas temperaturas se registraron en grados centígrados; para el cálculo de las unidades calor diarias se utilizó la siguiente fórmula:

$$UC = (T_{máx} + T_{mín})/2 - T_{base}$$

Donde:

UC: Unidades calor acumuladas para un día específico.

Tmáx. Temperatura máxima registrada por día.

Tmin. Temperatura mínima registrada por día.

Tbase. Temperatura base 10 °C.

Para la acumulación de las unidades calor se sumaron a lo largo del ciclo de crecimiento de las plantas de maíz, desde la siembra hasta el momento de la floración masculina; cuando el 50 % de las plantas estaban liberando polen y para la floración femenina cuando habían emergido los estigmas y se encontraban receptivos.

#### **Humedad (HUM).**

Al momento de la cosecha la máquina (John Deere, 9500) determinó en automático el porcentaje de humedad en la semilla.

#### **Variables fitosanitarias**

##### **Sanidad de mazorca (SANIDAD).**

Se determinó el porcentaje de mazorcas podridas del número total de plantas. Dando una calificación en una escala del 0-9; donde 0 estuvo totalmente infectada, 5-6 un valor intermedio y 8-9 mazorca completamente sana.

##### **Tolerancia a calor (TOLCAL).**

Se obtuvo el porcentaje total de daño en las mazorcas que presentaron granos pequeños, granos agrietados, hileras desuniformes, presencia de hongos, mazorcas con punta y llenado de mazorca incompleto, en relación con el total de mazorcas por planta. Dando una calificación en una escala del 0-9; donde: 0 fue susceptible, 5-6 moderadamente tolerante y 7-9 tolerante.

##### **Acame de raíz (ARAIZ).**

Se contó el número total de plantas que presentaron acame de raíz y se determinó el porcentaje en relación con el total de plantas.

#### **Compontes de rendimiento**

##### **Peso de la semilla (PSEM).**

El peso de la semilla se obtuvo al cosechar la parcela de manera inmediata, mediante una máquina cosechadora que determinó el peso de los híbridos en kg ajustado al porcentaje de humedad.

##### **Rendimiento de semilla (REND).**

La estimación de la producción en toneladas al momento de la cosecha se llevó a cabo de forma automatizada con la maquinaria especializada John Deere 9500.

## Análisis de la información

Con la información recabada de los 18 genotipos, se realizó el análisis de varianza para las variables evaluadas utilizando el modelo del diseño experimental con el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute, 2002). Las fuentes de variación fueron ambientes, genotipos y la interacción genotipo - ambiente. El diseño se describe detalladamente a continuación bajo el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + r_{j(i)} + g_k + \partial g_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = Observación del  $i$ -ésimo genotipo en su  $j$ -ésimo bloque en el  $k$ -ésimo ambiente;  $\mu$  = Efecto de la media general;  $\alpha_i$  = Efecto del ambiente en el  $i$ -ésimo genotipo;  $r_{j(i)}$  = Efecto del  $j$ -ésimo bloque anidado en el  $i$ -ésimo ambiente;  $g_k$  = Efecto del  $k$ -ésimo genotipo;  $\partial g_{jk}$  = Efecto de la interacción entre el  $j$ -ésimo genotipo anidado en el  $k$ -ésimo ambiente;  $\varepsilon_{ijk}$  = Efecto del error experimental.

Para identificar a los genotipos superiores se determinó por medio de su comportamiento; mediante el valor de decisión determinado por la media más uno y dos veces la desviación estándar ( $\mu + \varepsilon\varepsilon$ ;  $\mu + 2\varepsilon\varepsilon$ ).

## Correlación de Pearson (r)

Se realizó un análisis de correlación de Pearson (r) entre las variables de los 18 genotipos en los diferentes ambientes de evaluación. Con el objetivo de observar si existe correlación entre las variables evaluadas, por medio de la siguiente fórmula:

$$r = \frac{COV f_{x,y}}{\sqrt{\sigma^2 f_x} \sqrt{\sigma^2 f_y}}$$

Dónde:

$r$  = Coeficiente de correlación, mide el grado de asociación entre las variables  $X$  e  $Y$ ;  $COV f_{x,y}$  = Covarianza fenotípica entre los caracteres de estudio  $X$  e  $Y$ ;  $\sigma^2 f_x$  y  $\sigma^2 f_y$  = Varianzas fenotípicas de los caracteres  $x$  e  $y$ , respectivamente.

### **Estudio de la interacción genotipo – ambiente**

Se realizó un análisis y un gráfico de dispersión en el análisis de componentes principales (ACP) mediante el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI). La evaluación de los genotipos por ambiente se realizó para observar la interacción específica de los genotipos a través de los ambientes para la variable de rendimiento (REND) con el modelo que se presenta a continuación (Zobel, 1988):

$$y_{ge} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_{n=1}^N \lambda_n Y_{gn} \delta_{en} + \theta_{ge}$$

Donde:

$Y_{ge}$  = Variable de respuesta del rendimiento en el genotipo  $g$  dentro del ambiente  $e$ ;  $\mu$  = Media general;  $\alpha_g$  = Efecto de la desviación media del genotipo;  $\beta_e$  = Efecto de la desviación media del ambiente;  $\lambda_n$  = Valor propio de los componentes principales;  $Y_{gn}$   $Y_{gn}$  = Puntuación de los componentes principales del genotipo y el ambiente para el vector de los componentes,  $n$ ;  $N$  = Total de los vectores de los componentes principales en el modelo;  $\theta_{ge}$  = Error del genotipo  $g$  en el ambiente  $e$ .

### **Índice de selección**

Se utilizó la metodología propuesta por Barreto (1991). Algunas de las variables evaluadas presentan unidades paramétricas distintas ( $t \text{ ha}^{-1}$ , % y  $^{\circ}\text{C}$ ) por esta razón fue necesario estandarizar todas las unidades de medida para que pudieran compararse entre caracteres, obteniendo una media de 0 y una desviación estándar de 1 bajo la siguiente fórmula:

$$z = \frac{y_j - \bar{y}}{s}$$

Donde:

$Z$  = Representa al valor estandarizado;  $y_j$  = Es el valor observado para la variable  $j$ ;  $\bar{y}$  = Promedio de las variables;  $s$  = Desviación estándar del grupo de las variables.

**Cuadro 4.** Metas e intensidades propuestas para el índice de selección de caracteres agronómicos.

VARIABLE	INTENSIDAD	META ESTABLECIDA
GDUS_F (°C)	6	-1.89
SANIDAD (%)	8	1.52
TCALOR (%)	10	1.50
REND (tha <sup>-1</sup> )	9	1.43

GDUS\_FF= Unidades calor para floración masculina; SANIDAD= Sanidad de la mazorca; TCALOR= Tolerancia a calor; REND= Rendimiento de semilla.

La meta toma valores que van de -3.0 a +3; los valores negativos se utilizaron para aquellos genotipos que presentaron valores por debajo de la media poblacional, que representa a la variable evaluada; en contraste con los valores positivos que representaron a los genotipos con valores superiores a la media de la población; no obstante, para los genotipos que están próximos a la media se utiliza un valor cero.

Sin embargo, para la intensidad de selección los valores que se utilizaron van del 1 al 10. Aquí varía el valor según el criterio del mejorador. Por otra parte, los valores más bajos son atribuibles a los de menor interés y los valores superiores a los de mayor importancia y se aplicó la siguiente fórmula:

$$MD = \frac{Max - \bar{y}}{s}$$

Donde:

*MD* = Meta deseada; *Max* = Valor deseado de las variables de interés de los genotipos; superior o menor con respecto a la media; *ȳ* = Media de la variable; *S* = Es la desviación estándar de las variables de interés.

Las variables estandarizadas entre más cercanas estén a las metas establecidas, el índice de selección es menor; por consecuencia el genotipo estará de acuerdo con los objetivos. En contraste, con los valores más alejados serán los genotipos indeseables; el índice de selección se realizó con la siguiente fórmula:

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

Donde:

$IS$  = Variable de respuesta índice de selección;  $Y_{ijn}$  = Representa a la variable en unidades Z;  $M_{ijn}$  = El valor de las metas de índice de selección;  $I_{ijn}$  = Es la intensidad de selección.

### **Criterios de selección**

Para la selección de los genotipos superiores y mayor posibilidad de éxito comercial, se eligieron a los que presentaron un menor índice de selección con base a una presión de selección del 10 %, de acuerdo a sus valores observables y en respuesta a la interacción genotipo-ambiente en relación al índice de selección.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Análisis de varianza**

En el análisis de varianza (ANVA) se presentan los resultados de los genotipos evaluados y explica la interacción genotipo-ambiente. Esta información proviene tres localidades evaluadas en campo, con 18 genotipos de maíz, mediante los caracteres agronómicos evaluados en el ciclo I-V en el 2023.

En el Cuadro 6, se muestran los cuadrados medios obtenidos del análisis de varianza (ANVA) para seis variables agronómicas que fueron de interés en este estudio, en siete ambientes de evaluación.

**Cuadro 5.** Cuadrados medios del análisis de varianza de variables agronómicas de 18 híbridos evaluados en la zona norte de Tamaulipas en el 2023 I-V.

FV	GL	GDUS_FM	GDUS_FF	SANIDAD	TOLCALOR	PSEM	ARAIZ	HUM	REND
		(°C)	(°C)	(%)	(%)	(kg)	(%)	(%)	(t ha <sup>-1</sup> )
<b>Ambientes</b>									
<b>(Amb)</b>	6	3731470.61 **	4060433.43 **	27.91 **	13.17 **	101.68 **	70.54 **	370.61 **	39.32 **
<b>Bloques/Amb</b>	14	49.28 **	41.65	3.54 **	1.80 *	5.10 **	8.89 **	3.06 **	1.61 **
<b>Híbridos</b>	17	12400.66 **	14276.29 **	13.08 **	12.57 **	28.51 **	5.21 **	20.52 **	7.88 **
<b>Híbridos x Amb</b>	102	614.72 **	637.07 **	1.89 **	1.68 **	4.29 **	1.67 **	2.19 **	1.37 **
<b>Error</b>		22.00	32.49	1.25	1.00	1.59	0.73	0.87	0.49
<b>C. V (%)</b>		0.39	0.47	19.86	18.29	9.52	13.00	6.34	9.45

\*, \*\*, Significativo al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente; FV= Fuente de variación; GL= Grados de libertad; GDUS\_FM= Unidades calor para floración masculina; GDUS\_FF= Unidades calor para floración femenina; SANIDAD= Sanidad de la mazorca; TOLCALOR= Tolerancia a calor; PSEM= Peso de semilla; ARAIZ= Acame de raíz; HUM= Humedad de semilla; REND= Rendimiento de semilla; C. V= Coeficiente de variación; Amb= Ambientes.

Se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) en los Ambientes para todos los caracteres agronómicos evaluados, puede deberse a los diferentes tipos de suelos que se presentan en las localidades de estudio, aunque no sean contrastantes, son diferentes y cada ambiente presenta condiciones propias del lugar.

Respecto a Bloques dentro de Ambientes, no se encontraron diferencias significativas para GDUS\_FM. Sin embargo, la variable TOLCALOR que fue significativa ( $P \leq 0.05$ ). En contraste con el resto de las variables que fueron altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ). Lo que puede deberse a las altas temperaturas (mayores a 30°C), afectando de manera negativa el rendimiento cuando se presentan en la etapa de floración, provocando menor actividad fotosintética e inhibiendo la polinización (Pionner, 2022).

Los híbridos mostraron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) en todos los caracteres agronómicos evaluados, lo que era de esperarse debido a la variación genética de los mismos, ya que representan constitución genética de Sinaloa, Centro de México y Tamaulipas. Al presentar diferente constitución genética también fueron sometidos a condiciones de estrés por las altas temperaturas de la región. Aumentando la temperatura foliar, el balance energético y provocando una deficiencia fotosintética, provocando el aumento de la fotorrespiración. Afectando la actividad estomática, la regulación de la temperatura y la transpiración (Zavala *et al.*, 2022).

Para la interacción, genotipos por ambiente se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) en las variables evaluadas. Esta interacción es la expresión del comportamiento que tienen los genotipos con el ambiente a través de las localidades. De acuerdo con Bustos *et al.* (2022), algunos factores ambientales (fechas de siembra, manejo agronómico, densidad de plantas, condiciones de riego, etc.) pueden influir para que exista la interacción entre el genotipo y el ambiente. Esta interacción puede deberse al manejo agronómico diferente que le dio cada agricultor y a las fechas de siembra en cada uno de los ambientes de evaluación, más el factor ambiental.

### **Medias de las variables agronómicas evaluadas en la zona norte de Tamaulipas**

Se presentan en el Cuadro 7, los resultados de los valores medios de las características agronómicas en estudio a través de siete ambientes de Río Bravo (109\_14N y 109\_4N2) y Gustavo Díaz Ordaz (DMun, Morillo2, Refugio, Refugio2 y Palmas), que fueron los

ambientes más contrastantes en la evaluación, lo que permitió discriminar a los genotipos con base a ( $\mu+EE$ ) y ( $\mu+2EE$ ).

**Cuadro 6.** Medias de las variables agronómicas evaluadas x ambiente de dos localidades en la zona norte de Tamaulipas en 2023.

GENOTIPOS†	REND	GDUS_F	SANIDAD	TOLCALOR	ARAIZ	PSEM	HUM	GDUS_M	
								t/ha <sup>-1</sup>	°C
								%	%
<b>8Tam</b>	8.34 **	1231.85 **	5.95 *	5.76 *	6.61	15.28 **	16.83 **	1195.09 **	
<b>13Tam</b>	8.13 **	1234.57 **	6.71 **	6.61 **	6.23	14.58 **	15.24 **	1206.71 **	
<b>3Sin</b>	8.09 **	1184.85	5.80	5.80 *	6.33	14.48 **	15.04 *	1145.00	
<b>12Tam</b>	8.00 **	1231.66 **	5.85 *	5.90 **	6.90 **	14.27 **	14.75	1196.61 **	
<b>17Tam +</b>	7.93 **	1224.47 **	6.14 **	6.57 **	5.71	13.97 **	13.42	1204.66 **	
<b>14Tam</b>	7.88 **	1227.14 **	5.85 *	6.04 **	6.33	14.17 **	15.30 **	1191.28 *	
<b>11Tam</b>	7.83 **	1258.00 **	6.71 **	6.52 **	6.04	14.00 **	14.87	1206.71 **	
<b>16C_Mex</b>	7.63 *	1208.81	5.28	4.42	6.61	13.72 *	15.15 **	1169.85	
<b>5Tam</b>	7.60 *	1214.19 *	6.09 **	5.71 *	6.61	13.47	14.00	1172.52	
<b>4C_Mex</b>	7.40	1159.14	5.38	4.38	7.09 **	13.10	13.85	1139.28	
<b>7Sin</b>	7.23	1178.14	3.85	5.52	6.85 **	12.78	13.79	1157.57	
<b>6Tam +</b>	7.20	1219.04 *	6.71 **	5.57	7.61 **	13.02	15.72 **	1182.95 *	
<b>15Sin</b>	6.98	1192.47	5.25	5.05	5.80	12.55	15.33 **	1152.42	
<b>1Tam +</b>	6.91	1199.33	6.38 **	5.95 **	6.33	12.27	14.25	1158.81	
<b>2C_Mex</b>	6.79	1166.09	4.66	4.09	6.95 *	12.36	16.14 **	1146.00	
<b>18Sin</b>	6.59	1210.00	4.52	4.78	6.21	11.61	13.62	1171.14	
<b>10Sin</b>	6.51	1184.85	5.19	4.95	7.19 **	11.07	13.13	1145.00	
<b>9Sin</b>	6.31	1209.52	5.04	4.76	7.23 **	11.50	13.81	1182.95 *	
<b>Media_Gral</b>	7.42	1207.45	5.64	5.47	6.58	13.25	14.69	1174.22	
<b>EE</b>	0.14	6.14	0.18	0.18	0.12	0.27	0.23		5.47
<b>Media_T</b>	7.34	1214.28	6.41	6.03	6.55	13.08	14.46	1182.14	
<b>Media_HE</b>	7.42	1206.08	5.47	5.35	6.59	13.26	14.72	1171.87	

\*, \*\* = Genotipos superiores con base  $\mu+EE$  y  $\mu+2EE$ , respectivamente; †= Genotipos; += Testigos; La abreviatura identifica el origen de los genotipos: C\_Mex= Centro de México, Sin= Sinaloa y Tam= Tamaulipas; GDUS\_FM= Unidades calor para floración masculina; GDUS\_FF= Unidades calor para floración femenina; SANIDAD= Sanidad de la mazorca; TOLCALOR= Tolerancia a calor; PSEM= Peso de semilla; ARAIZ= Acame de raíz; HUM= Humedad de semilla; REND= Rendimiento de semilla; EE= Error estándar de la media; Media\_Gral= Media general; Media\_T= Media de los testigos; Media\_HE= Media de los genotipos experimentales.

Al realizar la comparación de los valores medios en relación con  $\mu+2\text{EE}$  de los genotipos evaluados en campo, para la variable REND, se identificaron los que obtuvieron un alto potencial de rendimiento, predominando aquellos con origen genético de Tamaulipas (8Tam, 13Tam, 3Sin, 12Tam, 14Tam, 11Tam (experimentales) y 17Tam, testigo), esto pudo deberse a que estos genotipos fueron seleccionados específicamente para ambientes locales de la región. El genotipo 3Sin ( $8.09 \text{ t ha}^{-1}$ ) que obtuvo un buen comportamiento en los ambientes, adaptándose a las condiciones climáticas propias de la región, siendo similares estadísticamente los genotipos con rendimientos de 8.34 (8Tam), 8.13 (13Tam), 8.00 (12Tam), 7.88 (14Tam), 7.83 (11Tam), y 7.93 (17Tam)  $\text{t ha}^{-1}$ , en contraste con los genotipos 10Sin, 9Sin, 18Sin, 2C\_Mex, 15Sin, (experimentales), 11Tam y 6Tam (testigo) que presentan bajos rendimientos con 6.51, 6.31, 6.59, 6.79, 6.98, 6.91 y  $7.23 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente. Los genotipos menos rendidores tuvieron una respuesta desfavorable a las condiciones climática, lo que se debe principalmente al acame de raíz. De acuerdo con lo antes mencionado se demuestra que los genotipos experimentales han superado a los testigos con rendimientos de  $0.08 \text{ t ha}^{-1}$  respecto con la media de los testigos. Sin embargo, los genotipos que presentaron valores en relación con  $\mu+\text{EE}$  fueron 16C\_Mex ( $7.63 \text{ t ha}^{-1}$ ) y 5Tam ( $7.60 \text{ t ha}^{-1}$ ).

Las variables GDUS\_M y GDUS\_F mostraron que los genotipos con genética de Tamaulipas presentaron un desarrollo fenológico más tardío ( $\mu+2\text{EE}$ ), en comparación con los provenientes del C\_Mex, que suelen ser más precoces. Ambas variables GDUS\_M y GDUS\_F señalan al genotipo 11Tam como el más tardío, con una acumulación de  $1218.00^\circ\text{C}$  (GDUS\_M) y  $1206.71^\circ\text{C}$  (GDUS\_F). Adicionalmente, el más precoz fue el genotipo 4C\_Mex en GDUS\_F ( $1159.14^\circ\text{C}$ ) y GDUS\_M ( $1139.28^\circ\text{C}$ ), obtuvo un rendimiento bajo de  $7.40 \text{ t ha}^{-1}$ . Con relación a  $\mu+\text{EE}$  los genotipos 13Tam, 14Tam, 9Tam, (experimentales) y 6Tam, (testigo) resultó tardío para la variable GDUS\_M y el 5Tam (experimental) en la variable GDUS\_F. La precocidad es la respuesta a las condiciones de altitud y temperatura, a una rápida acumulación de grados-día, que intervienen en el desarrollo del cultivo y a la adaptación a las condiciones ambientales específicas que aceleran su ciclo de desarrollo.

Para la variable SANIDAD los genotipos que presentaron valores superiores ( $\mu+2\text{EE}$ ), 13Tam, 5Tam, 11Tam, (experimentales), 1Tam, 11Tam y 17Tam (testigos). Respecto a  $\mu+\text{EE}$  son los genotipos 8Tam, 12Tam y 14Tam. Sin embargo, estos genotipos muestran tolerancia a enfermedades de pudrición en la mazorca, como las aflatoxinas y *Fusarium spp.* Estos valores (5.85 - 6.71 %) están relacionados con la calificación obtenida en campo, a mayor calificación mayor sanidad. En contraste con el 7Sin, que es un genotipo muy susceptible.

A condiciones de estrés por calor (TOLCALOR), los genotipos con origen de Tamaulipas (13Tam, 12Tam, 17Tam, 14Tam, 11Tam y 1Tam) fueron los más tolerantes a  $\mu+2\text{EE}$  y a  $\mu+\text{EE}$  el genotipo 8Tam, 5Tam y a excepción del 3Sin. Así mismo, se identificaron a los genotipos con origen de C\_Mex y de Sin susceptibles a altas temperaturas. De acuerdo con la constitución genética que presentan los genotipos de Tam, estos fueron seleccionados prevalentemente para este ambiente y han mostrado un buen comportamiento ante las condiciones climáticas de la zona, a excepción del 3Sin que resultó ser un buen genotipo mostró un buen rendimiento ( $\mu+2\text{EE}$ ) y una calificación aceptable en campo 5.80 superior a la  $\mu+\text{EE}$  tolerante a estrés por calor. Aquellos genotipos que presentaron valores inferiores son los más susceptibles, estos no lograron adaptarse a las condiciones de la región, en general mostraron tendencia a presentar enfermedades y signos de estrés en la mazorca por calor, estos factores repercuten fuertemente en el rendimiento en la calidad y sanidad de la semilla (Godina *et al.*, 2020). Para la variable ARAIZ, los genotipos 12Tam, 4C\_Mex, 7Sin, 6Tm, 9Sin y 10Sin fueron tolerante al acame de raíz ( $\mu+2\text{EE}$ ) y el genotipo 2C\_Mex, presentó tallos erectos y semierectos, fue capaz de soportar los fuertes vientos de la región, que por su cercanía al Golfo de México, tienden a presentar este problema, exhibiendo dificultades al momento de la cosecha, donde la máquina trilladora no alcanza a cosechar por el acame en la planta, resultando en bajos rendimientos en la zona lo que se deben principalmente al desarrollo radicular, disminuyen la capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo que provoca alteraciones en la fisiología de las raíces y afectando su morfología (Zhang *et al.*, 2023).

En la variable PSEM, los genotipos 8Tam, 13Tam, 3Sin, 12Tam, 17Tam, 14Tam y 11Tam fueron los que presentó mayor peso de semilla, valor superior ( $\mu+2EE$ ) por lo tanto, fueron los de mayor rendimiento y en relación ( $\mu+EE$ ) 16C\_Mex.

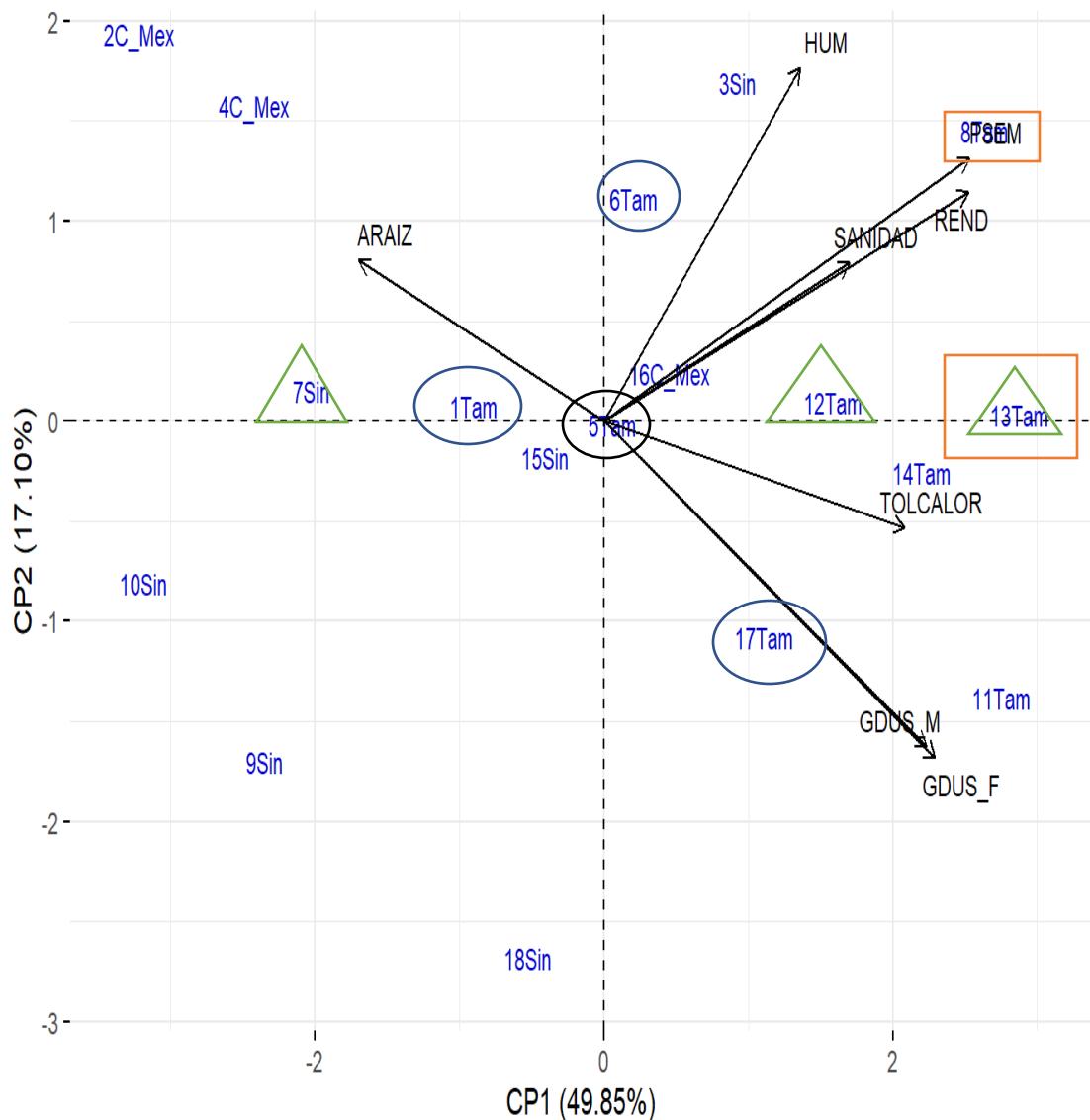
Para la variable HUM los genotipos que mostraron un mayor contenido de humedad en la semilla, con valores superiores a la media ( $\mu+2EE$ ), es 8Tam, 13Tam, 14Tam, 16C\_Mex, 6Tam, 15Sin y 2C\_Mex, y respecto a la media ( $\mu+EE$ ) el genotipo 3Sin. No obstante, los genotipos que mostraron menor contenido de humedad la semilla, con valores inferiores respecto a la media fueron: 4C\_Mex, 7Sin, 9Sin, 10Sin, 17Tam y 18Sin. Esto puede ser un factor que está correlacionado a los ciclos tardíos, dado que los genotipos Tam destacan en la variable GDUS\_M y GDUS\_F, no obstante, los genotipos de Sin y C\_Mex fueron de ciclos intermedios y precoces.

Aquellos genotipos de ciclo tardío tienden a estar expuestos a diversos factores agroclimáticos que juegan un papel crucial en la producción agrícola, ya que influyen en la fisiología de las plantas, en la disponibilidad de agua y nutrientes, a la interacción entre los genotipos y el ambiente, lo que se ve reflejado en el rendimiento. Los porcentajes reportados para el contenido de humedad son altos, la causa podría ser que en algunos ambientes se reportaron lluvias a unos días de cosechar, además de que el agricultor decidió en qué fecha cosechar. Considerando los hallazgos de este estudio, donde se expusieron cuatro genotipos de maíz, (dos genotipos susceptibles y dos genotipos tolerantes) a condiciones extremas de temperatura por un clima subtropical, para las variables unidades calor para floración y tolerancia a condiciones de estrés por calor, considera que la etapa de floración es importante para la adaptación a un factor que permita seleccionar genotipos que resistan mejor las condiciones de estrés y garanticen un buen rendimiento. La floración hembra y macho es un indicador de cómo la planta responde a las condiciones ambientales (temperatura, luz, disponibilidad de agua, entre otros) y puede adaptarse o sufrir estrés (Li *et al.*, 2023).

### **Interacción genotipos x caracteres a través de las localidades de evaluación**

En la Figura 1, se presenta el análisis de la interacción de los genotipos comerciales y pre comerciales con los caracteres evaluados. La figura se obtuvo a través del análisis de componentes principales, donde se presenta la dispersión gráfica de la variabilidad y las correlaciones entre caracteres, lo cual es relevante para interpretar cómo estos factores

están vinculados a cada genotipo. El origen diferente de los genotipos (Tam, C\_Mex, y Sin), permite ver si las condiciones específicas de cada ambiente influyen en el comportamiento de los caracteres. Los caracteres evaluados (GDUS\_M, GDUS\_F, SANIDAD, TOLCALOR, PSEM, ARAIZ, HUM, y REND), abarcan aspectos clave del desarrollo y rendimiento de los genotipos.



**Figura 1.** Dispersión gráfica de la variación de 18 genotipos con respecto a las variables evaluadas en los ambientes; Tam= Tamaulipas, C\_Mex= Centro de México y Sin= Sinaloa, representan el origen de los genotipos; 1Tam, 6Tam y 17Tam los testigos; GDUS\_M= Unidades calor para floración masculina; GDUS\_F= Unidades calor para floración femenina; SANIDAD= Sanidad de la mazorca; TOLCALOR= Tolerancia a calor; PSEM= Peso de semilla; ARAIZ= Acame de raíz; HUM= Humedad de semilla; REND= Rendimiento de semilla.

En la Figura 1, de ACP se observa una relación positiva de la variable humedad de la semilla (HUM) con respecto al peso de la semilla (PSEM) y rendimiento de semilla (REND), estos caracteres están estrechamente correlacionados, a mayor peso de semilla, mayor rendimiento. En cuanto al contenido de humedad de la semilla (HUM), es independiente respecto a los caracteres de TOLCALOR, pero no a SANIDAD, dado a que mayor contenido de humedad, los genotipos son más susceptibles a estrés por calor y a mayor incidencia de enfermedades Las temperaturas mayores a 30 °C favorecen al estrés hídrico y aumentando la transpiración (Pionner, 2022).

El carácter acame de raíz (ARAIZ), presenta independencia con el peso del grano (PGRA), ya que la resistencia de las plantas a acamarse no necesariamente afecta directamente el peso del grano, está relacionado con el grado de inclinación que presentan las plantas. Así mismo, la sanidad de la mazorca (SANIDAD) y las unidades calor para floración (GDUS\_M y GDUS\_F), respecto a la tolerancia a calor (TOLCALOR), indicando que la sanidad del grano podría depender más de la tolerancia a estrés biótico que de la floración.

El carácter acame de raíz (ARAIZ) está asociado negativamente con las variables TOLCALOR, SANIDAD, GDUS\_M y GDUS\_F. Esta asociación depende de las altas temperaturas que afectan significativamente el desarrollo radicular en el maíz, disminuyendo la capacidad que tiene el maíz para absorber agua y nutrientes, afectando el crecimiento y rendimiento de la planta. Principalmente por el estrés térmico que afecta la fisiología de las raíces (Zhang *et al.*, 2023).

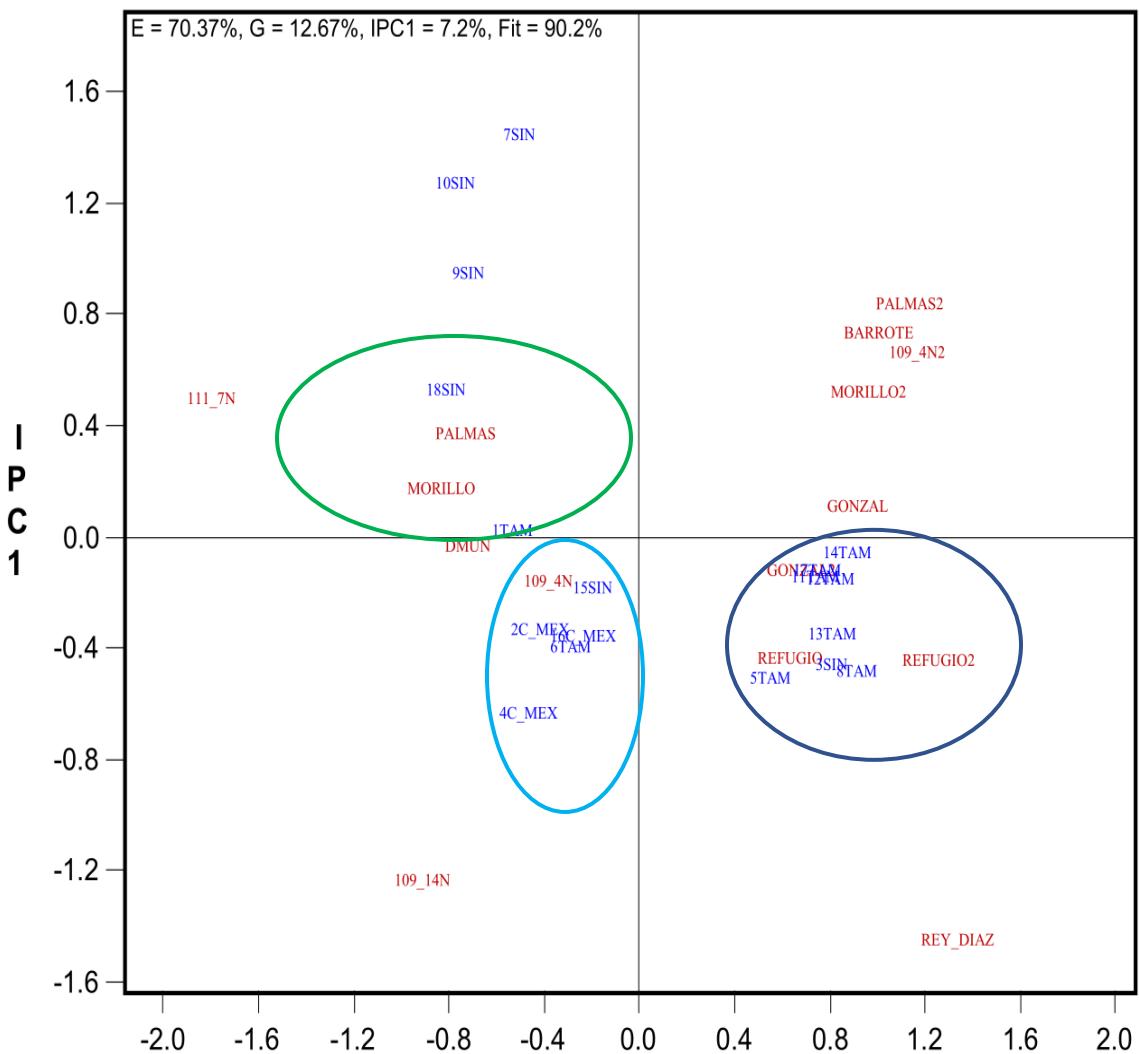
En cuanto a los genotipos de híbridos comerciales y experimentales a través de los caracteres en los ambientes evaluados, el genotipo 8Tam (experimental) mostró estar relacionado positivamente, con PSEM, REND y SANIDAD; los genotipos 13Tam, 12Tam y 14Tam como se muestra en el Cuadro 7. Presentan un buen rendimiento de 8.13, 8.00 y 7.88 t ha<sup>-1</sup>, para la variable HUM el genotipo que presentó mayor contenido de humedad es el 3Sin y 6Tam. Por otra parte, el genotipo 16C\_Mex (experimental) fue más tolerante a enfermedades, por estar relacionado positivamente con la variable SANIDAD, al obtener una calificación promedio en campo del 5.28 %. Para los caracteres de GDUS\_M y GDUS\_F, los genotipos 14Tam, 11Tam (experimentales) y 17 Tam (testigo) mostraron ser los más tardíos, y los más precoces los genotipos 4C\_Mex, 7Sin y 2C\_Mex.

El genotipo 8Tam es el que presentó mayor peso de semilla. Los genotipos presentaron mayor porcentaje de tolerancia al acame son el 4C\_Mex, 7Sin y 2C\_Mex (experimentales), estos genotipos obtuvieron una calificación buena en campo, que va del 6 a 7 %. Mientras que el genotipo 5Tam aparece en el origen, lo que generalmente significa que no tiene una asociación fuerte ni positiva ni negativa respecto a los caracteres representados por los vectores, es decir tiene un comportamiento promedio. Finalmente, los genotipos 10Sin, 9Sin, 18Sin y 15Sin son los genotipos que tienden a tener un efecto negativo respecto a HUM, PSEM, SANIDAD y REND, por lo tanto, son los menos rendidores, tienen un menor porcentaje de humedad en la semilla y menor peso de semilla. Los componentes CP1 y CP2 explican el 66.95 %, (49.85 % y 17.10%) de la variación fenotípica existente en los caracteres evaluados. Donde cada ángulo conformado por vectores, indican el grado de correlación entre ellos, que puede ser estrecha ( $<30^\circ$ ) lo que muestra que tienden a aumentar o disminuir conjuntamente, ángulos independientes entre sí ( $90^\circ$ ), indican que la variación de uno no influye en la variación del otro y correlación negativa ( $180^\circ$ ), lo cual implica que mientras uno aumenta, el otro disminuye (Velasco *et al.*, 2021).

Fu *et al.* (2023) subrayó la importancia de considerar la interacción entre caracteres fenotípicos y condiciones ambientales, principalmente la luz y la temperatura al seleccionar genotipos. La identificación de estas correlaciones puede facilitar la creación de nuevos híbridos, no sólo de alto rendimiento, sino que también presenten los caracteres deseables en función de las condiciones específicas del ambiente. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para los programas de mejoramiento, ya que permiten una selección más precisa de genotipos que optimicen el rendimiento bajo diferentes condiciones ambientales.

### **Rendimiento promedio y estabilidad de los genotipos evaluados a través de los ambientes**

En la Figura 2, se presenta el rendimiento promedio de los genotipos y la estabilidad evaluados a través de los ambientes. La Figura se obtuvo por el modelo de AMMI, donde clasificaron los genotipos que presentaron altos y bajos rendimientos, así como identificar los ambientes donde los genotipos fueron más y menos rendidores.



**Figura 2.** Rendimiento y estabilidad de los genotipos evaluados a través de los ambientes; Genotipos del 1 a 18; origen TAM= Tamaulipas, C\_MEX= Centro de México y SIN= Sinaloa; 1TAM, 6TAM y 17TAM; testigos respectivamente; bajo el modelo de AMMI; donde el componente principal representan el 90.2 % ( $E= 70.37\%$ ,  $G= 12.67\%$  y  $IPC1= 7.2\%$ ) del efecto de la interacción genotipo ambiente; respecto a la variable de rendimiento a través de las localidades; 109\_4N2; 109\_4N; 109\_14N y 111\_7N; correspondientes al municipio de Río Bravo; MORILLO; PALMAS; MORILLO; MORILLO2; PALMAS; PALMAS2; REY\_DIAZ; REFUGIO2; DMUN y finalmente REFUGIO ubicadas en la localidad de Gustavo Díaz Ordaz; En la localidad de Camargo; GONZAL y GONZAL2.

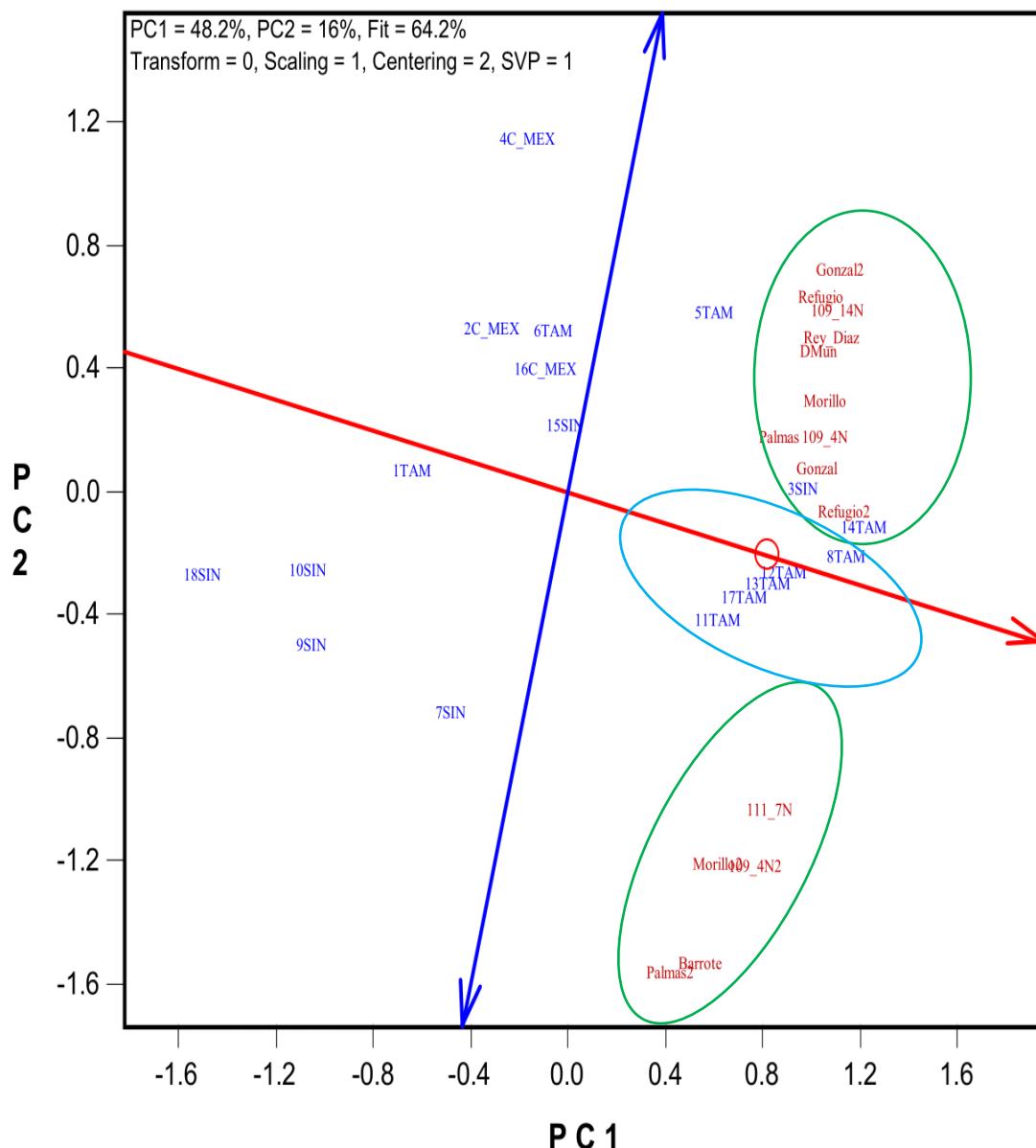
En el eje de la abscisa señala el rendimiento promedio de los genotipos, en cuanto al eje de la ordenada identifica a la interacción de los genotipos con los ambientes de evaluación. Los genotipos que se encuentran en la parte superior derecha del cuadrante identifican a los ambientes que obtuvieron mayor rendimiento, de Gustavo Díaz Ordaz fueron las PALMAS2, BARROTE y el MORILLO2 a excepción del 109\_4N2 que se encuentra en Río Bravo, en contraste con el ambiente de GONZAL en Camargo, REFUGIO, REFUGIO2 y REY\_DIAZ donde los genotipos reportaron un mayor rendimiento, pero mostraron ser más inestables. Sin embargo, en GONZAL2 los genotipos que se comportaron estables y con un mayor rendimiento en ese ambiente fueron el 1Tam, 11Tam, 12Tam, 14Tam, 16Tam y 17Tam. En el ambiente del REFUGIO los genotipos 3Sin, 5Tam, 8Tam y 13Tam, tuvieron alto potencial de rendimiento.

No obstante, los genotipos menos rendidores y que presentaron estabilidad con el ambiente son el 7Sin, 9Sin y 10Sin; en cuanto a los ambientes PALMAS, MORILLO (ubicados en González Díaz Ordaz) y 111\_7N de Río Bravo los genotipos mostraron tener menor rendimiento, pero también una menor interacción en relación con los ambientes antes mencionados. En las PALMAS el genotipo 18SIN fue estable y con bajo rendimiento. Los genotipos inestables y con bajo rendimiento de grano son 15SIN, 2C\_MEX, 16C\_MEX, 6TAM y 4C\_MEX, sin embargo, fueron los genotipos que mostraron ser estables a las condiciones del ambiente en 109\_4N en Río Bravo. En el ambiente de 109\_4N los genotipos tendieron a ser muy inestables y con bajo potencial de rendimiento. El genotipo 14TAM fue el más inestable, pero presentó un buen rendimiento, y el genotipo 1TAM se comportó con estabilidad, pero con menor rendimiento, y en el ambiente DMUN ubicado en Río Bravo los genotipos se comportan de una manera inestable y con bajo rendimiento.

De acuerdo con Bruno (2021), mencionó que el modelo AMMI es útil para identificar aquellos genotipos rendidores y estables que responden a las variantes del ambiente, por su capacidad para descomponer la interacción genotipo-ambiente en componentes principales (CP), lo que permite identificar los genotipos estables a través de ambientes. Resultados similares se obtuvieron recientemente con genotipos de maíz donde los genotipos fueron estables y rendidores, lo que es una buena opción para seleccionar genotipos en ambientes específicos (Ma *et al.*, 2024).

### **Interacción genotipo x ambiente para rendimiento de semilla**

En el análisis de la interacción híbrido x ambiente para rendimiento de semilla, se presenta a través de la Figura 3, es comúnmente utilizado para representar cómo diferentes genotipos responden a distintos ambientes en términos de rendimiento. Donde se presenta la dispersión de los genotipos y ambientes, con una variación del 64.2 % (CP1 48.2 % y CP2 16 %), del total de la variación existente para el rendimiento de semilla.



**Figura 3.** Interacción genotipo x ambiente en rendimiento de semilla; Genotipos del 1 al 18; Origen TAM= Tamaulipas, C\_MEX= Centro de México y SIN= Sinaloa; 1TAM, 6TAM y 17TAM testigos respectivamente; Bajo el modelo de AMMI; Donde se representan el 64.2 % de la variación (PC1= 48.2 % y PC2= 16 %) del efecto de la interacción genotipo ambiente en rendimiento de semilla; Las localidades; 109\_4N2; 109\_4N; 109\_14N y 111\_7N; Correspondientes a las localidades de Río Bravo; Morillo; Palmas; Morillo2; Palmas; Palmas2; Rey Díaz; Refugio2; DMun y finalmente Refugio ubicadas en la localidad de Gustavo Díaz Ordaz; En la localidad de Camargo; Gonzal y Gonzal2.

Los genotipos que están cerca de la abscisa (línea paralela) de izquierda a derecha, son los más estables a través de los ambientes de evaluación, y los que están ubicados en la ordenada, pero alejados del origen, tienden a presentar un comportamiento positivo a ambientes específicos. De acuerdo con su estabilidad los genotipos que presentan valores positivos en la abscisa, 8TAM y 12 TAM tienen potencial de rendimiento, en contraste con el 1TAM (testigo) que es estable, pero presenta un bajo rendimiento, al igual que los genotipos 18SIN, 10SIN, 9SIN y 7SIN. Los genotipos que se encuentran cerca de la ordenada indican una adaptación mejor a las condiciones ambientales: 4C\_MEX, 2C\_MEX, 6TAM (testigo), 16C\_MEX y 15SIN. Por otra parte, los genotipos que presentan un buen rendimiento son 12TAM, 13TAM, 17TAM (testigo) y 11TAM, pero mayor interacción con el ambiente, esto es, suelen ser más inestables. Para los ambientes, el genotipo 5TAM es el que se adaptó mejor a las condiciones ambientales y al manejo de los agricultores en el Refugio, Rey Díaz, y DMun, localidades que pertenecen al ambiente de Gustavo Díaz Ordaz y 109\_14N ambiente de Río Bravo. El 3SIN fue el genotipo que mejor se adaptó al manejo y a las condiciones ambientales de Camargo en el ambiente de Gonzal, y el genotipo 14Tam se adaptó a las condiciones ambientales de Gustavo Díaz Ordaz (Refugio2). Mientras que, en Gustavo Díaz Ordaz (Gonzal2, Refugio, Rey\_Díaz, DMun, Morillo, Refugio2 y Palmas), Río Bravo (109\_14N) y Camargo (Gonzal y Gonzal2) fueron contrastantes con Río Bravo (111\_7N y 109\_4N2) y Gustavo Díaz Ordaz (Morillo, Barrote y Palmas2), estas localidades dentro de los ambientes fueron las que afectaron de manera divergente el rendimiento de los genotipos, permitiendo discriminar a los genotipos por condiciones ambientales y por el manejo de los agricultores, favoreciendo a ciertos genotipos en algunos ambientes, pero en otros no.

Esta información puede corroborarse en el Cuadro 7, donde existen pequeñas diferencias con relación a la Figura 3, en el Cuadro 7, se muestra toda la variación existente en los valores, mientras que en la Figura 3, se muestra solo una porción de la variación total (64.2 %). Por lo tanto, al interpretar la Figura es importante mencionar que no estamos viendo el 100 % de la variación existente (Alhassan *et al.*, 2021).

### Selección de genotipos mediante el índice de selección

En el Cuadro 5, se presentan los valores de las metas e intensidades propuestas para los caracteres que fueron considerados como relevantes ante las condiciones ambientales para la selección de los genotipos (GDUS\_F, SANIDAD, TOLCALOR y REND), evaluados a través de los ambientes en el 2023.

**Cuadro 8.** Índice de selección de las variables evaluadas en el norte de Tamaulipas 2023.

GENOTIPOS	GDUS_F (°C)	SANIDAD (%)	TOLCALOR (%)	REND (t ha <sup>-1</sup> )	ÍNDICE
<b>13Tam</b>	1191.76	6.31	6.24	7.83	1.36
<b>11Tam</b>	1215.14	6.48	6.10	7.66	1.82
<b>17Tam +</b>	1180.90	6.10	6.38	7.52	2.62
<b>12Tam</b>	1190.38	5.69	5.72	7.76	3.57
<b>5Tam</b>	1172.34	5.90	5.66	7.59	3.61
<b>8Tam</b>	1189.79	5.79	5.52	8.00	3.64
<b>14Tam</b>	1185.55	5.69	5.97	7.46	3.80
<b>3Sin</b>	1144.90	5.38	5.52	7.75	4.60
<b>6Tam +</b>	1177.72	6.69	5.59	6.93	5.21
<b>1Tam +</b>	1160.00	6.45	5.90	6.62	6.12
<b>Medias</b>	1207.45	5.64	5.47	7.42	

Genotipos= 11Tam, 12Tam, 13Tam, 5Tam, 8Tam, 14Tam, 3Sin (experimentales), 17Tam +, 6Tam + y 1Tam + (testigos); Origen; Tam= Tamaulipas; Sin= Sinaloa; representan los 10 mejores genotipos de la selección, respecto a las variables consideradas de mayor importancia para la zona de evaluación; GDUS\_F= Unidades calor para floración femenina; SANIDAD= Sanidad de la mazorca; TOLCALOR= Tolerancia a calor y REND= Rendimiento de semilla.

De acuerdo con el trabajo que realizaron Ibarra *et al.* (2020), donde seleccionaron líneas de maíz tolerantes a condiciones de estrés por sequía, consideraron que son los caracteres relacionados con este factor los que afectan el rendimiento, es por lo que se seleccionaron los caracteres agronómicos antes mencionados.

Con relación a la información que se presenta en el Cuadro 8, aplicando una presión del 10 %, los genotipos que presentaron el valor más bajo se estiman como sobresalientes para recomendar en el siguiente ciclo de selección. De acuerdo con esto se consideran dos genotipos (13Tam y 11Tam), experimentales con base a genotipos de ciclo intermedio, tolerantes a enfermedades de la mazorca, al presentar un mayor índice de SANIDAD, es decir, si lo relacionamos con la calificación obtenida en campo, a mayor calificación mayor SANIDAD, condiciones de estrés por altas temperaturas y altos rendimientos. Para la variable GDUS\_F el híbrido 13Tam y 11Tam obtuvieron valores superiores con relación a la media general (13Tam, 25.66°C) (11Tam 49.04°C) resultando más tardíos. Para la variable SANIDAD los híbridos presentaron un porcentaje aceptable, para poder considerarse como tolerantes a enfermedades, deben ser superiores a la media (5.64%). De la misma manera sucede con la variable TOLCALOR, con media general de 5.47%, porcentaje de superioridad 0.77% (13Tam) y 0.63% (11Tam), lo que indica que estos híbridos pueden presentar características deseables a la tolerancia a condiciones de estrés por calor, relacionado con las altas temperaturas que se presentan en la región, sobre todo durante el verano, y finalmente con respecto al rendimiento (REND) también fueron superiores 13Tam con  $0.41\text{tha}^{-1}$  y 11Tam  $0.24\text{tha}^{-1}$ . El genotipo 8Tam es el de mayor rendimiento, pero en este índice se encuentra en el lugar sexto lugar, esto puede ser porque se le dio mayor importancia a la variable de SANIDAD donde este genotipo muestra un valor promedio. De acuerdo con el índice de selección estos valores muestran que los híbridos seleccionados pueden considerarse para ser evaluados en el siguiente ciclo de selección. Resultados similares muestra Rodríguez *et al.* (2023) al seleccionar variables de su interés y de acuerdo con los objetivos planteados, superaron a los valores obtenidos de la media poblacional.

## CONCLUSIONES

Al realizar la selección de híbridos (experimentales y comerciales) para el Norte de Tamaulipas, con base en la variable rendimiento de semilla y otras características de interés, se identificaron nuevos genotipos experimentales, aquellos que, no sólo presentan un alto rendimiento, sino también una estabilidad superior en las condiciones evaluadas de Río Bravo, Camargo y Gustavo Díaz Ordaz.

Se identificaron dos genotipos de Tamaulipas (8Tam y 12Tam) con potencial de rendimiento y estabilidad superiores a los testigos, con 0.5 % para el híbrido 8Tam y 0.26 % para el 12Tam.

Se identificó un genotipo de Sinaloa (3Sin), con buen potencial de rendimiento en la zona norte de Tamaulipas.

Con base en el índice de sección, aplicando una presión del 10 % se identificaron los híbridos 13Tam y 11Tam precoces a floración femenina, sanidad de mazorca, tolerancia a calor y rendimiento.

## REFERENCIAS

- Alhassan, M., Tongoona, P., Parzies, H. K., & Ofori, K. (2021). Genotype by environment interaction and stability of sorghum landraces using AMMI and GGE biplot analysis. *PLOS ONE*, 16(10), e0258211. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258211>
- Bandera F., E. (2023). Métodos de análisis de la interacción genotipo x ambiente en maíz (*Zea mays*, Poaceae). *Revista del Jardín Botánico Nacional*, vol.44. p 33. Editorial Universitaria de la República de Cuba.
- Barreto H.J., Bolaños J. A., y Córdova H.S. (1991). Programa índice de selección. Guía para la operación del software. CIMMYT. México, D.F. 27 p.
- Bruno, C., & Balzarini, M. (2021). El modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) y su uso en la interacción genotipo-ambiente: Comparación de datos completos e incompletos de GxE. *Revista Científica de Modelos Agrícolas*, 12(4), 145–159.
- Bustos K. D., Boer P.M., Layton J., Gehringer A., Tang T., Wehrens R., Messina C., de la Vega A.J., y Van E. F. (2022). Identification of environment types and adaptation zones with self-organizing maps; applications to sunflower multi environment data in Europe. *Theor. Appl. Genet.* 135: 2059–2082.
- Cieza Ruiz, I., Jara Calvo, T. W., Terrones Monteza, R., Figueroa Cobeñas, Y. C., & Valdera Catusol, A. (2020). Características agronómicas, componentes de producción y rendimiento de grano de híbridos de maíz (*Zea mays*). *Manglar*, 17(3), 261-267. <https://doi.org/10.17268/manglar.2020.038>
- CONAGUA. 2023. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvias. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. (Consulta marzo 2023).
- Fu R., Zhang X., Liu X., & Chen Z. (2023). Modeling the influence of phenotypic on maize hybrid yield. *Plants Communications*, 4(3), 10051048.
- Garay-Martínez, JR, Godina-Rodríguez, JE, Maldonado-Jáquez, JA, Lucio-Ruiz, F., Joaquín-Cancino, S., Bautista-Martínez, Y., & Granados-Rivera, LD (2024). Nutritive value of maize and soybean silages at different ratio in a subtropical

- climate condition. *Revista Chilena de Investigaciones Agrícolas*, Vol. 84. No .4. <https://doi.org/10/s071-583920>
- Garay-Martínez, JR, Godina-Rodríguez, JE, Maldonado-Jáquez, JA, Lucio-Ruiz, F., Joaquín-Cancino, S., Bautista-Martínez, Y., & Granados-Rivera, LD (2024). Nutritive value of maize and soybean silages at different ratio in a subtropical climate condition. *Revista Chilena de Investigaciones Agrícolas*, Vol. 84. No .4. <https://doi.org/10/s071-583920>
- García M. P. J., Manayay S. D., Medina C. D. E., & Ortecho Ll. R. (2021). Uso del modelo AMMI para el análisis de la interacción genotipo-ambiente en variedades de maíz amiláceo de Tayacaja, Perú. *Revista Tayacaja*, 4(1), 9-24. <https://doi.org/ISSN:2617-9156>
- García, L., Fernández, D., Rubio, E., Martínez, M., & Tijerina, L. (2020). Maize (*Zea mays* L.) yields in southern Mexico calculated by the Decision Support System for Agrotechnology Transfer. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 859-870. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.751>
- Godina, L. M., Pérez, J. F., Rodríguez, A. G., & Hernández, P. C. (2020). Identificación de genotipos de alto rendimiento y calidad de semilla para zonas con condiciones adversas. *Revista de Agricultura y Ciencia*, 15(2), 45-60.
- González C. A., Arteaga R. R., Sánchez C. I., Soria R. J., & Monterroso R., A. I. (2024). Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 15(1): 328-362. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>
- González-Martínez, J., Rocandio-Rodríguez, M., Contreras-Toledo, AR, Joaquín-Cancino, S., Vanoye-Eligio, V., Chacón-Hernández, JC, & Hernández-Bautista, A. (2020). Diversidad morfológica y agronómica de maíces nativos del altiplano de Tamaulipas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 43 no.4 <https://doi.org/10/rfm.202>
- Guamán Guamán, R. N., Desiderio Vera, T. X., Villavicencio Abril, Á. F., Ulloa Cortázar, S. M., & Romero Salguero, E. J. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*, 7(2), 49-60.

- Ibarra Sánchez, E., Castillo Gutiérrez, A., Núñez Valdés, M. E., Suárez Rodríguez, R., Andrade Rodríguez, M., & Perdomo Roldán, F. (2020). Caracterización de la respuesta a la sequía de líneas segregantes de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7).  
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2196><https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>
- Lagos S. L. K., Duarte A. D. E., & Lagos B. T. C. (2024). Genotype-by-environment interaction of *Solanum quitoense* (Lam.) using the AMMI model. *Fruits*, 18(2).  
<https://doi.org/10.17584/rcch.2024v18i2.17442>
- Li, H., Liu, K., Zhibin, L., Zhang, M., Zhang, Y., Li, S., Wang, X., Zhou, J., Zhao, Y., Liu, T., & Li, C. (2023). Mixing trait-based corn (*Zea mays* L.) cultivars increase yield through pollination synchronization and increased cross-fertilization. *The Crop Journal* 11(1), 291-300. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.05.007>
- Ma, C., Liu, C., & Ye, Z. (2024). *Influence of Genotype × Environment Interaction on Yield Stability of Maize Hybrids with AMMI Model and GGE Biplot*. *Agronomy*, 14(5), 1000. [https://doi.org/10.3390/agronomy14\(5\),1000](https://doi.org/10.3390/agronomy14(5),1000)
- Mederos R. A., & Ortiz P. R. (2021). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la soya (*Glycine max* (L) Merrill). *Cultivos Tropicales*, 42(1), e10. Ediciones INCA. <https://doi.org/10.1234/ct.v42i1.1584>
- Nyaga C., Gowda M., Beyene Y., Murithi W. T., Burgueno J., Toledo F., Makumbi D., Olsen M. S., Das B., M S. L., Bright J. M., & Prasanna, B. M. (2020). Hybrid breeding for MLN resistance: heterosis, combining ability, and hybrid prediction. *Plants*, 9(4), 468. <https://doi.org/10.3390/plants9040468>
- Odjo, S., Alakonya, AE, Rosales-Nolasco, A., Molina, AL, Muñoz, C., & Palacios-Rojas, N. (2022). Occurrence and postharvest strategies to help mitigate aflatoxins and fumonisins in maize and their co-exposure to consumers in Mexico and Central America. *Control de Alimentos*, 138, <https://doi.org/10.1016/j.comidacont.2022.108>
- Pierre, J. F., Latournerie-Moreno, L., Garruña, R., Jacobsen, K. L., Laboski, C. A. M., Us-Santamaría, R., & Ruiz-Sánchez, E. (2022). *Effect of Maize–Legume Intercropping on Maize Physio-Agronomic Parameters and Beneficial Insect Abundance*. *Sustainability*, 14(19), 12385. <https://doi.org/10.3390/su141912385>

- Pioneer. (2022). *Efectos del estrés por calor en maíz: Actualización de Investigaciones Agronómicas*. Pioneer Agronomy. Disponible en: <https://www.pioneer.com> (Consulta noviembre 2024).
- Ponce E. M. C., López M. F., Chura C. J., Hernández L. E., Hernández S. G., & Aragón G. A. (2022). Interacción genotipo-ambiente del rendimiento en híbridos de maíz amarillo mediante AMMI y SREG. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(7), 1-15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3070>
- Rodríguez P. G., García R. A., Reynaga F. F., Mendivil M. J., & Ochoa M. A. R. (2023). Índices de selección entre caracteres agronómicos y químicos en híbridos de maíz morado (*Zea mays* L.) en el sur de Sonora, México. *Anales Científicos*, 84(1), 35-53. <https://doi.org/10.21704/ac.v84i1.1981>
- SADER. 2020. Maíz blanco o amarillo es cultivo de tradición y desarrollo. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Disponible en línea: <https://www.gob.mx/agricultura/articulo/maiz-blanco-o-amarillo-es-el-cultivo-de-tradicion-y-desarrollo>. (Consulta junio 2023).
- SADER. 2023. Fomento a la agricultura, Ganadería, Pesca y Acuicultura. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/programas-de-la-secretaria-de-agricultura-y-desarrollo-rural-20243>. (Consulta febrero 2024).
- Saravia Castillo, G. (2024). *Comportamiento de 42 híbridos simples de maíz amarillo duro en condiciones de La Molina* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Agronomía, Lima, Perú
- SAS Institute (2002). SAS/STAT ® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 5121 p.
- Shull G. H. (1908). The composition of a field of maize. *Am. Breed. Assoc. Rep.*, 4: 296-301.
- SIAP. 2023. Panorama agroalimentario. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>. (Consulta enero 2024).
- Singamsetti, A., Shahi, J. P., Zaidi, P. H., Seetharam, K., Vinayan, M. T. (2021). Genotype x environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L.) hybrids across

- moisture regimes. *Field Crops Research*, 270, 108224  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108224>
- Velasco-García, Á. M., García-Zavala, J. J., Sahagún-Castellanos, J., Lobato-Ortiz, R., Sánchez-Abarca, C., & Marín-Montes, I. M. (2020). Análisis de la variabilidad morfológica de maíces nativos y exóticos en Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(4-A), 517-524.
- Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. P., Cano-Ríos, P., & Rodríguez-Moreno, V. M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3). <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2294>
- Zhang, Y., Li, M., & Wang, Q. (2023). *Effects of High Temperature on Root Morphology and Functionality in Maize: Physiological Implications and Stress Responses*. Plant Science, 328, 111532.
- Zobel R. W., Wright M. J and Gauch H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80: 388-399.