



DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO EN MAÍCES NATIVOS E HÍBRIDOS EN RESPUESTA AL MANEJO AGRONÓMICO

YIELD DETERMINANTS IN NATIVE AND HYBRID MAIZE IN RESPONSE TO AGRONOMIC MANAGEMENT

Gustavo García-Hernández¹, Rogelio Araujo-Díaz¹, Gaspar Estrada-Campuzano^{*2}, Carlos G. Martínez-Rueda² y José A. López-Sandoval²

¹Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Toluca, Estado de México, México. ²UAEMex, Facultad de Ciencias Agrícolas. Toluca, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (gestradac@uaemex.mx)

RESUMEN

El rendimiento de grano en maíz es función del genotipo, el manejo agronómico y las condiciones ambientales. El objetivo de la presente investigación fue estudiar el impacto del manejo agronómico y las condiciones ambientales sobre los determinantes del rendimiento de grano y sus componentes, en maíces nativos e híbridos de Valles Altos. El experimento se llevó a cabo en el Valle de Toluca, México, en el ciclo primavera-verano del 2023. Los híbridos Faisán® y Cherokee® y los maíces nativos Amarillo Zanhoria y Nativo Blanco se evaluaron a 40, 50, 60 y 90,000 plantas ha⁻¹ en marzo, abril y mayo. El diseño utilizado fue bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Para el factor fecha, los valores medios mostraron que el maíz sembrado en el mes de abril presentó el mayor rendimiento de grano, con 9.2 t ha⁻¹, debido a una mayor producción de biomasa a madurez (1835 g m⁻²), un mayor índice de cosecha (0.4) y un mayor número de granos por m² (3229). Para el factor genotipo, los valores medios mostraron que Faisán obtuvo el mayor rendimiento de grano, con 7.1 t ha⁻¹, debido a un mayor índice de cosecha (0.4) y un mayor número de granos por m² (2623). El maíz nativo Amarillo Zanhoria fue superior en la tasa de crecimiento promedio en 28, 25 y 22 % con respecto al resto de los genotipos evaluados. El incremento en la densidad de plantas durante el periodo crítico disminuyó la tasa de crecimiento promedio por planta. En abril se observaron cuatro índices ambientales favorables para la siembra de maíz y en mayo únicamente dos. La interacción fecha (abril) x genotipo (Faisán) x densidad (90 mil plantas ha⁻¹) generó el mayor rendimiento de grano, con 11.7 t ha⁻¹.

Palabras clave: (*Zea mays* L.), índice ambiental, manejo agronómico, tasa de crecimiento.

SUMMARY

Corn grain yield depends on genotype, agronomic management, and environmental conditions. The objective of this study was to investigate the impact of agronomic management and environmental conditions on the determinants of grain yield and its components in native and hybrid corn varieties from the Valles Altos region. The experiment was conducted in the Toluca Valley, Mexico, during the spring-summer growing season of 2023. The Faisán® and Cherokee® hybrids and the native corn varieties Amarillo Zanhoria and Nativo Blanco were evaluated at 40, 50, 60, and 90,000 plants ha⁻¹ in March, April, and May. A completely randomized block design with four replications was used. For the date factor, the mean values showed that corn

planted in April had the highest grain yield, at 9.2 t ha⁻¹, because of higher biomass production at maturity (1,835 g m⁻²), a higher harvest index (0.4), and a higher number of grains per m² (3,229). For the genotype factor, the mean values showed that Faisán obtained the highest grain yield, at 7.1 t ha⁻¹, because of a higher harvest index (0.4) and a higher number of grains per m² (2,623). The native corn Amarillo Zanhoria was superior in average growth rate by 28, 25, and 22 % compared to the rest of the evaluated genotypes. The increase in plant density during the critical period decreased the average growth rate per plant. In April, four favorable environmental indices were observed for corn planting, and only two in May. The interaction of planting date (April) x genotype (Faisán) x planting density (90,000 plants ha⁻¹) yielded the highest grain yield, at 11.7 t ha⁻¹.

Keywords: (*Zea mays* L.), agronomic management, environmental index, growth rate.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más importantes en el comercio agrícola global (Desloires *et al.*, 2023). El rendimiento de grano puede evaluarse a partir del número de granos por m² y peso individual de grano, así como de las relaciones de estos componentes con el crecimiento del cultivo y la partición de biomasa a lo largo del ciclo (Andrade *et al.*, 2023). La densidad de población es importante para aumentar el rendimiento de grano, al incrementar el número de granos por unidad de superficie (Tollenaar y Lee, 2002; Duvick, 2005). Por otra parte, el rendimiento de grano está influenciado por una combinación de factores genéticos, prácticas de manejo agronómico y las condiciones ambientales locales (Deines *et al.*, 2021; Djaman *et al.*, 2022). La elección de la fecha de siembra es una parte fundamental del manejo agronómico y suele depender de factores como la disponibilidad de recursos, el momento adecuado para realizar las labores o estrategias para evitar problemas climáticos. Es importante comprender e interpretar cómo la variabilidad en la fecha de siembra influye en la productividad del cultivo (Andrade

et al., 2023). El número de granos por m^2 se define en torno a la antesis, etapa en la cual el maíz requiere condiciones ambientales óptimas y recursos adecuados para fijar el mayor número de mazorcas por m^2 y, por ende, el número de granos por mazorca (Andrade *et al.*, 1996). Sin embargo, la etapa de antesis está condicionada por el periodo crítico del cultivo. Éste ocurre de 15 a 20 días antes de la floración femenina, periodo en el que cualquier tipo de estrés modificará el número final de granos (Echarte *et al.*, 2004) y, por consecuencia, el rendimiento de grano por unidad de superficie (Andrade *et al.*, 1999). La tasa de crecimiento durante el periodo crítico presenta amplia relación con el número de granos; sin embargo, esta relación solo se ha estudiado en materiales híbridos y en otras latitudes. En este sentido, entender los procesos ecofisiológicos que regulan la formación de estructuras reproductivas es clave para maximizar el rendimiento del maíz, ajustando el manejo del cultivo a las condiciones específicas de cada ambiente (Andrade *et al.*, 2023). De la misma manera, la adecuada densidad y fecha de siembra, más la elección de la variedad adecuada, son determinantes para definir el rendimiento en cualquier región (Baum *et al.*, 2020).

Los efectos fisiológicos de la densidad de población y la fecha de siembra para el cultivo de maíz se han documentado en regiones potenciales. En el suroeste de EE. UU., Djaman *et al.* (2022) evaluaron seis densidades de población (54 700, 64 600, 74 600, 88 000, 101 700 y 120 100 plantas ha^{-1}) durante 2019 y 2020 observando el mayor rendimiento de grano (16.8 t ha^{-1}) en la fecha de siembra del 23 de abril con la densidad de 101 700 plantas ha^{-1} ; no obstante, este rendimiento fue estadísticamente similar a la densidad de 88 mil plantas ha^{-1} en 2019. En 2020, el mayor rendimiento de grano (17.0 t ha^{-1}) se obtuvo con la densidad de 88 mil plantas ha^{-1} y la fecha de siembra 18 de mayo. Estos hallazgos resaltan la importancia de ajustar tanto la densidad de población como la fecha para optimizar el rendimiento en diferentes condiciones ambientales.

En otras zonas con mayores restricciones ambientales se ha observado que el uso de una baja densidad de población (30 – 40 mil plantas ha^{-1}) y un retraso en la fecha de siembra mejora el uso de los recursos, aumentando la plasticidad reproductiva y vegetativa de la planta de maíz (Otegui y Mercau, 2021). En este sentido, Maddonni *et al.*, 2021 y Massigoge *et al.*, 2022 mencionan que, en regiones marginales con elevadas temperaturas y déficit hídrico de Argentina, el manejo de la estructura del cultivo basado en fechas de siembra tardías y bajas densidades de población proporciona mayor estabilidad en el rendimiento de grano. Algunos estudios llevados a cabo en esa zona muestran que con una densidad de 36 mil plantas ha^{-1} se obtuvo mayor rendimiento, comparada con una densidad de 73

mil plantas ha^{-1} , mientras que, los híbridos con rasgos de prolificidad (DK69-10 y DM2738) en baja densidad de plantas han mostrado rendimientos de hasta 6.9 t ha^{-1} , con una aportación de hasta 30.5 % al rendimiento total a través de los macollos (Maltense *et al.*, 2022).

En los Valles Altos de México, Tadeo *et al.* (2015), al evaluar el rendimiento de los maíces nativos Ixtlahuaca y Atlacomulco en relación con los híbridos H-50 y H-52, en dos fechas de siembra, a una densidad de población de 60 mil plantas ha^{-1} , observaron que los mayores rendimientos se presentaron en la primera fecha de siembra (17 de mayo) y cosecha a 177 y 160 días, con 8.5 y 7.4 t ha^{-1} , respectivamente. En la segunda fecha de siembra (01 de junio) y cosecha a 162 y 145 días hubo menores rendimientos, con 7.1 y 6.0 t ha^{-1} para cada híbrido evaluado. Por otra parte, Martínez *et al.* (2018) evaluaron el rendimiento de 10 híbridos de maíz blanco en cinco ambientes y cinco fechas de siembra (Cuendó 5 de abril, Jocotitlán 13 de abril, Ixtlahuaca 23 de abril, Temascalcingo 3 de mayo y Jilotepec 25 de mayo) utilizando una densidad de población de 95 mil plantas ha^{-1} y observaron que los híbridos Atziri Puma, con 12.0 t ha^{-1} y Tsiri Puma, con 11.8 t ha^{-1} , fueron de productividad media, seguidos por los híbridos H-50, H-66 y H-70, que produjeron 11.5, 11.6 y 11.6 t ha^{-1} , respectivamente. En la localidad de Jocotitlán se observó el mayor rendimiento promedio, con 12.4 t ha^{-1} de grano. Por otra parte, Quiroz *et al.* (2017), al evaluar 10 variedades de maíz, ocho híbridos y dos poblaciones nativas en tres localidades del Estado de México, con las densidades de población 104 167, 78 125 y 62 500 plantas ha^{-1} , observaron que a 104 167 plantas ha^{-1} el rendimiento fue de 10.0 t ha^{-1} y que el genotipo P204W, con 10.0 t ha^{-1} , obtuvo el mayor rendimiento de grano. Finalmente, Espinosa *et al.* (2013), al evaluar el rendimiento de grano de genotipos precoces de maíz de grano amarillo para Valles Altos de México sembrados en el mes de junio en condiciones de secano, utilizando una densidad de población de 45 mil plantas ha^{-1} , observaron que los genotipos con mayor rendimiento de grano fueron Oro Ultra UNAM C, con 6.9 t ha^{-1} , V-55 A, con 6.2 t ha^{-1} , V-53 A, con 6.0 t ha^{-1} y V-54 A, 5.4 t ha^{-1} . Por lo tanto, la fecha y densidad de población óptima para obtener el máximo rendimiento de grano deben determinarse según las condiciones locales (Andrade *et al.*, 2023; Djaman *et al.*, 2022).

En los Valles Altos de México es necesario generar y actualizar la información sobre cómo se obtiene el rendimiento de grano de maíz. Los estudios anteriormente mencionados resaltan que la fecha y densidad de población óptimas deben ser determinadas en función de las condiciones locales, los recursos disponibles y los genotipos específicos. En esta región existe la necesidad

de actualizar la información sobre los efectos genéticos y ambientales para optimizar el rendimiento de grano en maíz. Por lo tanto, los objetivos de esta investigación fueron (i) estudiar el impacto de la densidad de población y fecha de siembra sobre el rendimiento de grano y sus componentes, (ii) estudiar la relación entre la densidad de población y fecha de siembra con la tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico y (iii) estudiar la relación entre el rendimiento de grano y el índice ambiental en cuatro genotipos de maíz en Toluca, Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se estableció en el ciclo primavera-verano 2023 en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizada en las coordenadas geográficas 19° 15' 33" de LN y 99° 39' 38" de LO, a una altitud de 2640 msnm. De acuerdo con García (1988), el clima predominante es del tipo C(w2)(w)b(i), templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y escasa precipitación pluvial en invierno (5 %), poca oscilación térmica, temperatura media anual de 14.0 °C y precipitación anual promedio de 900 mm (González *et al.*, 2009).

Tratamientos, diseño y parcela experimental

El material genético evaluado fue dos híbridos de cruza trilineal de maíz Faisán (ASGROW, 2022) y Cherokee (ASPROS, 2022) y dos variedades locales de la región de Valles Altos (Nativo Blanco de la comunidad de El Cerrillo Piedras Blancas y Amarillo Zanahoria (ICAMEX, 2025). Las fechas de siembra consideradas en la investigación fueron el 8 de marzo, 5 de abril y 8 de mayo de 2023, con las densidades de población 40, 50, 60 y 90 mil plantas ha⁻¹. Cada fecha se consideró como un ambiente en particular en donde los 16 tratamientos surgidos de las combinaciones posibles de los 4 genotipos x las 4 densidades de población se evaluaron mediante un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

En cada fecha de siembra la unidad experimental estuvo formada por cuatro surcos separados a 80 cm, con una longitud de 5 m cada uno. En éstas, los 4 genotipos y las 4 densidades de población fueron aleatorizados, formando un total de 64 unidades experimentales. El diseño experimental fue bloques completos al azar, con cuatro repeticiones; cada bloque estuvo formado por 16 unidades experimentales. Independiente a cada bloque (repeticición) se sembraron dos parcelas adicionales, con un total de 8 parcelas con densidad variable (40, 50, 60, 70, 80 y 90 mil plantas ha⁻¹) incluidas las 4 densidades utilizadas en

el experimento, para cada uno de los cuatro genotipos. Cada parcela adicional estuvo formada por cuatro surcos separados a 80 cm, con una longitud de 5 m cada uno. La finalidad de la parcela adicional fue obtener diversidad en la morfología vegetativa y reproductiva de las plantas, para la creación del modelo de estimación de biomasa durante el periodo crítico del cultivo (muestreo destructivo). Las 8 parcelas adicionales no formaron parte del diseño experimental y no fueron aleatorizadas. La primera parcela adicional de cada genotipo se conformó por cuatro surcos separados a 80 cm con una longitud de 5 m cada uno. En el surco uno se usó la densidad de 50 mil plantas ha⁻¹, en el dos 60 mil plantas ha⁻¹, en el tres 70 mil plantas ha⁻¹ y en el cuatro 80 mil plantas ha⁻¹. La segunda parcela adicional de cada genotipo se conformó por cuatro surcos separados a 80 cm con una longitud de 5 m cada uno. En el surco uno se usó la densidad de 40 mil plantas ha⁻¹, en el dos 50 mil plantas ha⁻¹, en el tres 60 mil plantas ha⁻¹ y en el cuatro 90 mil plantas ha⁻¹.

Condiciones generales del experimento

Las siembras de los meses de marzo y abril contaron con un riego inicial, mientras que la siembra de mayo fue establecida en condiciones de temporal. Durante todo el ciclo, el cultivo se mantuvo libre de maleza mediante un control químico (Gesaprim Calibre 90® 2 kg ha⁻¹ como pre-emergente y Peak Turbo® 500g ha⁻¹, como post-emergente). En la siembra se fertilizó con la dosis de NPK de 69-46-60 utilizando como fuentes urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio, respectivamente. A los 70 días después de la siembra se fertilizó con 138-00-00 unidades de N ha⁻¹.

Tasa de crecimiento

En la etapa V14, que corresponde a 20 días antes de la floración, se seleccionaron 10 plantas de los dos surcos centrales de cada unidad experimental para medir y registrar la altura de la planta y el diámetro del tallo. Al mismo tiempo, de las dos parcelas adicionales (sometidas a densidad variable) y anexas a cada bloque, se seleccionaron al azar otras 10 plantas del mismo genotipo, 5 de la parcela uno y 5 de la parcela dos, con la finalidad de alimentar el modelo para la predicción de la tasa de crecimiento durante el periodo crítico, en las cuales se midieron y registraron las mismas variables. Posteriormente, estas plantas fueron cortadas y llevadas a una estufa de secado Terlab® TE/E45D, donde se mantuvieron a 60 °C durante 72 horas para obtener su peso seco, que se determinó utilizando una balanza Denver Instrument® modelo MXX612.

La biomasa pre-floración se estimó con el programa Microsoft Excel mediante el modelo propuesto por Andrade *et al.* (1999).

$$Y = a + b (vt)$$

Donde: a es la ordenada al origen, b el coeficiente de regresión y vt el volumen de tallo.

La biomasa pos-floración se estimó 20 días después de la floración. En esta etapa se midieron la altura de planta, el diámetro del tallo, así como el diámetro del jilote de las 10 plantas previamente seleccionadas en la etapa anterior a antesis. Al mismo tiempo, de la parcela adicional a cada bloque, se seleccionaron otras 10 plantas al azar y se midieron y registraron las mismas variables. Posteriormente, estas plantas fueron cortadas y llevadas a una estufa de secado, donde se mantuvieron a 60 °C durante 72 horas para obtener su peso seco, que se determinó utilizando una balanza. La biomasa pos-floración se estimó con el paquete estadístico SAS® mediante el modelo propuesto por Andrade *et al.* (1999).

$$Y = a + b1 (Vt) + b2 (dj)$$

Donde: a es la ordenada al origen, $b1$ el coeficiente de regresión, Vt el volumen de tallo, $b2$ el coeficiente de regresión y dj el diámetro de jilote.

La tasa de crecimiento promedio se estimó de la siguiente manera:

$$TCP = \frac{PSPPOST - PSPRE}{FPOST - FPPE}$$

Donde: $PSPRE$ es el peso seco pre-floración, $PSPPOST$ el peso seco pos-floración, $FPPE$ el número de días del muestreo pre-floración y $FPOST$ el número de días del muestreo pos-floración.

Índice ambiental

Para cada combinación de fecha de siembra (3) y densidad de población (4) se calculó el rendimiento promedio de grano de los 4 genotipos evaluados, obteniéndose un total de 12 combinaciones promedio correspondientes a los distintos ambientes de evaluación. Posteriormente, a partir de estos 12 promedios se estimó la media general del experimento. Finalmente, el índice ambiental de cada ambiente se determinó mediante la diferencia entre su rendimiento promedio y la media general. De esta manera se obtuvieron 12 índices ambientales, cuyos valores positivos identificaron ambientes favorables para la expresión del rendimiento, mientras que los valores negativos correspondieron a ambientes menos favorables.

Producción de biomasa, rendimiento y sus componentes

En la etapa de madurez fisiológica se cosecharon las 10 plantas previamente seleccionadas de cada unidad experimental para medir la tasa de crecimiento. Las mazorcas por planta se contaron y se trillaron por separado para determinar el número de granos por mazorca, el peso seco del grano y el rendimiento de grano final. Además, por m² se registraron el número de mazorcas y el número de granos.

Para determinar el peso individual de grano se contaron y pesaron 1 000 granos de cada unidad experimental, con tres repeticiones. La materia seca de cada estrato (hojas y tallo principal) se obtuvo secando las muestras en una estufa de aire forzado a 60 °C durante 72 h. Esto permitió calcular los componentes fisiológicos del cultivo, incluyendo la biomasa. Por último, el índice de cosecha se obtuvo al dividir el rendimiento de grano entre la biomasa obtenida.

Condiciones climáticas

La temperatura y precipitación ocurridas durante el experimento para las etapas de emergencia (E), floración masculina (VT), floración femenina (R1) y madurez fisiológica (R6) se tomaron de la estación meteorológica Davis® Vantage Pro 2, que se ubica en el sitio donde se condujo el experimento.

Análisis estadístico

En éste se realizó un análisis de varianza combinado de acuerdo con el modelo "SAS Sistem For Mixed Models" (Littell *et al.*, 1996). Cuando la prueba de F de los análisis de varianza fue significativa se realizó la separación de medias a través de la prueba de Tukey, a un nivel de significancia del 5 %, utilizando el paquete estadístico R para Windows versión 4.0.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas durante el experimento se detallan en la Figura 1. En ella se observa que en el mes de marzo se presentaron temperaturas bajas, que oscilaron entre 2 y 6 °C desde la emergencia y hasta V3, así como una precipitación de 156 mm, que se prolongó desde la emergencia hasta la etapa de antesis VT, lo cual provocó daños en el maíz sembrado en esta fecha, disminuyendo significativamente la producción de biomasa y por consecuencia el rendimiento de grano. De acuerdo con los resultados obtenidos por Saéz *et al.* (2024), la sequía afectó la producción de biomasa al reducir la absorción de

nutrientes y el movimiento de agua hacia los órganos de la planta, además de limitar el intercambio gaseoso y la transpiración, determinando un periodo sensible del maíz al déficit hídrico, desde los 20 hasta los 55 días después de la siembra.

Para el maíz sembrado en abril, las condiciones climáticas fueron generalmente favorables. La temperatura media, desde la emergencia hasta 20 días después de la antesis, fue de 16.4 °C, con una precipitación de 331 mm.

Finalmente, para el maíz sembrado en mayo, las condiciones ambientales también fueron favorables en términos de temperatura media, que fue de 17 °C desde la emergencia hasta 20 días después de la antesis. No obstante, la precipitación acumulada de 360 mm durante este periodo estuvo acompañada de granizadas y vientos intensos, que causaron desgarre de hojas y acame de plantas, lo cual pudo impactar negativamente el número de granos y, en consecuencia, el rendimiento de grano final. Papucci *et al.* (2022), al simular el daño foliar causado por granizo, reportan resultados similares, al observar

reducciones de 12 % a 15 % en el rendimiento de grano, de 10.5 % en el grosor de grano, de 8.4 % en longitud de grano, de 5.7 % en ancho de grano y de 4.5 % en peso de 100 granos.

En el Cuadro 1 se muestran los resultados del análisis de varianza y su significancia estadística para las variables estudiadas, donde se aprecia que para el factor fecha y genotipo hubo efectos estadísticos significativos en todas las variables evaluadas. En cambio, para el factor densidad se observaron efectos significativos únicamente para las variables rendimiento de grano, biomasa a madurez, número de granos por m², número de mazorcas por m² y tasa de crecimiento promedio. Por otra parte, para la interacción genotipo por densidad se observaron efectos significativos en la mayoría de las variables evaluadas con excepción de índice de cosecha y peso de 1 000 granos. En cuanto a la interacción fecha por genotipo se observaron efectos significativos en todas las variables evaluadas. Para la interacción fecha por densidad se detectaron efectos significativos en la mayoría de las variables evaluadas con excepción de índice de cosecha y tasa de

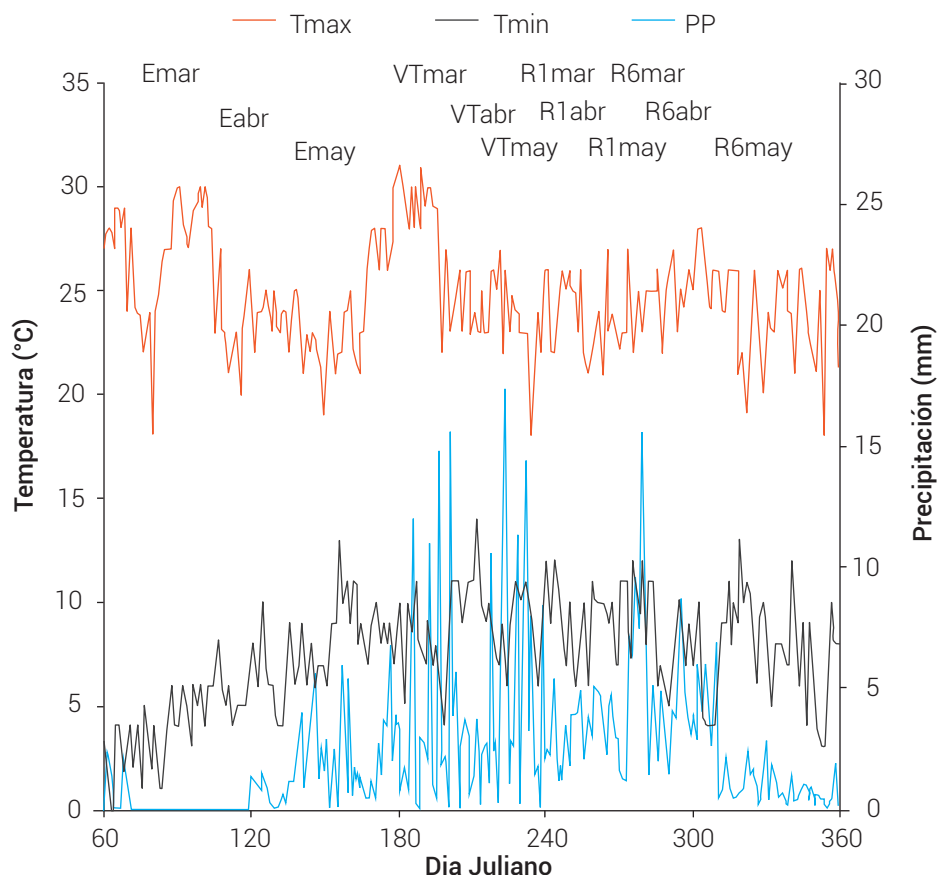


Figura 1. Condiciones agroclimáticas ocurridas durante la conducción del trabajo experimental. E: emergencia, VT: floración masculina, R1: floración femenina, R6: madurez fisiológica.

Cuadro 1. Análisis de varianza y su significancia estadística para cuatro genotipos de maíz en Toluca, México.

Fuente de variación	g.l.	RG (g m²)		IC		BIOMM (g m²)		PMG (g)		NG (m²)		NGMZ		NM (m²)		TCPROM (g m² día¹)	
Fecha	2	265.5	**	66.7	**	93.9	**	124.8	**	259.3	**	252.3	**	17.2	**	53.5	**
Genotipo	3	42.9	**	45.2	**	43.0	**	27.1	**	68.3	**	14.3	**	70.5	**	22.4	**
Densidad	3	33.9	**	3.2	*	101.8	**	4.3	ns	55.8	**	1.6	ns	83.2	**	8.0	**
G x D	9	10.7	**	0.7	ns	11.7	**	1.6	ns	10.0	**	5.9	**	4.2	**	5.9	**
F x G	6	24.3	**	7.6	**	30.2	**	8.5	**	21.7	**	9.6	**	46.8	**	55.2	**
F x D	6	18.0	**	1.7	ns	38.4	**	4.8	**	27.5	**	3.9	**	18.4	**	2.0	ns
F x G x D	18	7.5	**	1.2	ns	6.7	**	2.8	**	12.9	**	6.7	**	5.7	**	3.4	**
Error (CM)	135	6121.4		0.0		29,459.6		49,754.4		8991.1		952.7		0.9		0.4	
CV %		12.0		10.9		11.3		6.5		10.7		10.3		12.9		19.6	

RG: rendimiento de grano, IC: índice de cosecha, BIOMM: biomasa a madurez, PMG: peso de mil granos, NG: número de granos por m², NGMZ: número de granos por mazorca, NM: número de mazorcas por m², TCPROM: tasa de crecimiento promedio, G: genotipo, D: densidad y F: fecha. CM: cuadrado medio, *, **: diferencias estadísticas significativas a P ≤ 0.05 y P ≤ 0.01, respectivamente.

crecimiento promedio. Por último, para la interacción fecha x genotipo x densidad se observaron efectos significativos en la mayoría de las variables, con excepción de índice de cosecha.

De manera general, el maíz sembrado en abril presentó los mayores valores del rendimiento de grano, índice de cosecha, biomasa a madurez y número de granos por m². En comparación con las siembras realizadas en marzo y mayo, el rendimiento de grano fue superior en 86 % y 42 %, el índice de cosecha aumentó 26 % y 15 %, la biomasa a madurez se incrementó en 50 % y 13 % y el número de granos por m² fue mayor en 91 % y 37 %, respectivamente. Por otro lado, el maíz sembrado en mayo destacó por presentar un mayor peso de 1000 granos y una tasa de crecimiento promedio superior. El peso de 1000 granos superó en 15 % y 6 % al registrado en las siembras de marzo y abril, respectivamente. En contraste, el genotipo Amarillo Zanahoria registró la mayor tasa de crecimiento promedio, con incrementos de 28 %, 25 % y 22 % respecto a Cherokee, Nativo Blanco y Faisán, respectivamente. Respecto al factor genotipo, el híbrido Faisán presentó el mayor número de granos por m², superando en 28 %, 23 % y 12 % a Amarillo Zanahoria, Nativo Blanco y Cherokee, respectivamente. En contraste, el genotipo local Amarillo Zanahoria registró la mayor tasa de crecimiento promedio, con incrementos de 28 %, 25 % y 22 % respecto a Cherokee, Nativo Blanco y Faisán, respectivamente.

En cuanto al efecto de la densidad de población, la densidad de 90 mil plantas ha⁻¹ mostró los mejores resultados en rendimiento de grano, biomasa a madurez, número de granos por m² y número de mazorcas por m². En comparación con las densidades de 40, 60 y 50 mil

plantas ha⁻¹, el rendimiento de grano fue superior 21 %, 21 % y 13 %, la biomasa a madurez aumentó 32 %, 36 % y 25 %, el número de granos por m² se incrementó en 25 %, 22 % y 17 % y el número de mazorcas por m² fue mayor en 36 %, 34 % y 26 %, respectivamente. La densidad de 50 mil plantas ha⁻¹ presentó el mayor índice de cosecha, superando en 5.2 %, 2.6 % y 7.8 % a las densidades de 40, 60 y 90 mil plantas por ha⁻¹, respectivamente. Finalmente, la densidad de 40 mil plantas ha⁻¹ registró la mayor tasa de crecimiento promedio, con incrementos de 2 %, 14 % y 17 % respecto a las densidades de 50, 60 y 90 mil plantas ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 2).

En la Figura 2 se observa que, en general, para las tres fechas de siembra, la respuesta de los cuatro genotipos al incremento en la densidad de población fue diferente en cuanto al rendimiento de grano. Los cuatro genotipos sembrados en marzo disminuyeron su rendimiento con el aumento en la densidad de población. De acuerdo con Otegui *et al.* (1995), el aumento en la densidad de población causa la competencia entre plantas por los recursos. El mayor rendimiento de grano se observó en el híbrido Cherokee (5.4 t ha⁻¹) con la densidad de 60 mil plantas ha⁻¹, lo que coincidió con Tadeo *et al.* (2015), quienes observaron que el genotipo nativo Ixtlahuaca a 60 mil plantas ha⁻¹ presentó el mayor número de granos por hilera, pero en una fecha de siembra tardía. Finalmente, el resto de los genotipos disminuyeron el rendimiento de grano al pasar de 60 a 90 mil plantas ha⁻¹. Por otra parte, en la siembra de abril, el híbrido Faisán presentó el mayor rendimiento de grano (11.7 t ha⁻¹), seguido del genotipo Nativo Blanco con un rendimiento de 10.9 t ha⁻¹ a una densidad de 90 mil plantas ha⁻¹, lo que coincidió parcialmente con los resultados obtenidos por Martínez *et*

Cuadro 2. Valores medios y su significancia estadística para 4 genotipos de maíz en Toluca, México.

Factores	RG(g m ²)	IC	BIOMM(g m ²)	PMG(g)	NG(m ²)	NGMZ	NM(m ²)	TCPRM (g m ² día ⁻¹)
Fecha								
Marzo	367 c	0.3 c	1075 c	313.5 c	1158 c	165 b	7.9 a	1.8 c
Abril	925 a	0.4 a	1835 a	342.5 b	3229 a	375 a	8.1 a	3.5 b
Mayo	648 b	0.3 b	1636 b	365.5 a	2382 b	352 a	6.8 b	5.3 a
Genotipo								
Cherokee	685 a	0.4 a	1536 b	320.6 b	2344 b	294 b	8.5 a	3.2 b
N. Blanco	633 b	0.3 b	1633 a	326.7 b	2088 c	315 a	7.2 b	3.3 b
Faisán	719 a	0.4 a	1613 a	356.6 a	2623 a	305 ab	8.5 a	3.4 b
A. Zanahoria	549 c	0.3 b	1280 c	358.1 a	1970 c	276 c	6.1 c	4.2 a
Densidad								
40 000	600 c	0.3 ab	1375 c	345.6 a	2042 c	303 a	6.6 c	3.8 a
50 000	597 c	0.4 a	1318 c	333.4 b	2110 c	301 a	6.8 c	3.7 ab
60 000	651 b	0.3 ab	1494 b	336.3 ab	2244 b	295 a	7.4 b	3.3 ab
90 000	738 a	0.3 b	1874 a	346.7 a	2628 a	291 a	9.4 a	3.2 c
Media	646.6	0.3	1515.3	340.5	2256.3	297.3	7.6	3.5

RG: rendimiento de grano, IC: índice de cosecha, BIOMM: biomasa a madurez, PMG: peso de mil granos, NG: número de granos por m², NGMZ: número de granos por mazorca, NM: número de mazorcas por m², TCPRM: tasa de crecimiento promedio. Medias con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

al. (2018), quienes concluyeron que la siembra de abril, con una densidad de población de 95 mil plantas ha⁻¹, mostró el mayor rendimiento de grano en Jocotitlán, con un promedio de 12.4 t ha⁻¹. El resto de genotipos mostraron una respuesta negativa al incremento en la densidad de población, relacionada con una menor producción de biomasa y una mayor competencia intraespecífica. De acuerdo con investigaciones recientes (Herrera *et al.*, 2026), este comportamiento es fisiológicamente coherente, ya que en densidades altas el sistema radical tiende a estabilizarse tras alcanzar su máximo desarrollo, debido a la competencia por recursos y a la redistribución de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas. Por último, para la siembra de mayo, en general, se observó una respuesta positiva al incremento de la densidad de población por parte de los cuatro genotipos. Sin embargo, el mayor rendimiento de grano (9.0 t ha⁻¹) se observó con el genotipo Faisán a una densidad de 90 mil plantas ha⁻¹.

En la Figura 3 se observa el número de granos por planta y su relación con la tasa de crecimiento promedio; se aprecia que el número de granos por planta se incrementó como consecuencia de una alta tasa de crecimiento promedio conforme la densidad de población disminuyó. De acuerdo con Andrade *et al.* (1999), las densidades bajas indujeron

altas tasas de crecimiento por planta, debido a una mayor distribución de la materia seca en las estructuras reproductivas, resaltando la importancia fisiológica de la relación entre el número de granos y la tasa de crecimiento por planta.

El mayor número de granos por planta (303) se observó con una tasa de crecimiento promedio de 3.8 g m⁻² día⁻¹ (Figura 3a). Por otra parte, el número de granos por planta mostró una respuesta negativa al incremento en la densidad de población, por lo que el mayor número de granos por planta (303) se observó con cuatro plantas por m² (Figura 3b). Por último, el incremento en la densidad de población afectó negativamente la tasa de crecimiento promedio por planta, como consecuencia de la competencia intraespecífica. Sin embargo, de acuerdo con Quiroz *et al.* (2017), el análisis del rendimiento de grano por unidad de superficie demostró el aumentar la densidad de población disminuyó el número de granos por planta, pero, a una densidad de 104,167 plantas ha⁻¹, el rendimiento de grano por parcela puede llegar a 10.0 t ha⁻¹ en genotipos híbridos. En esta investigación, la mayor tasa de crecimiento promedio (3.8 g m⁻² día⁻¹) se observó con cuatro plantas por m² (Figura 3c). Resultados similares fueron observados por Andrade *et al.* (1999), donde la

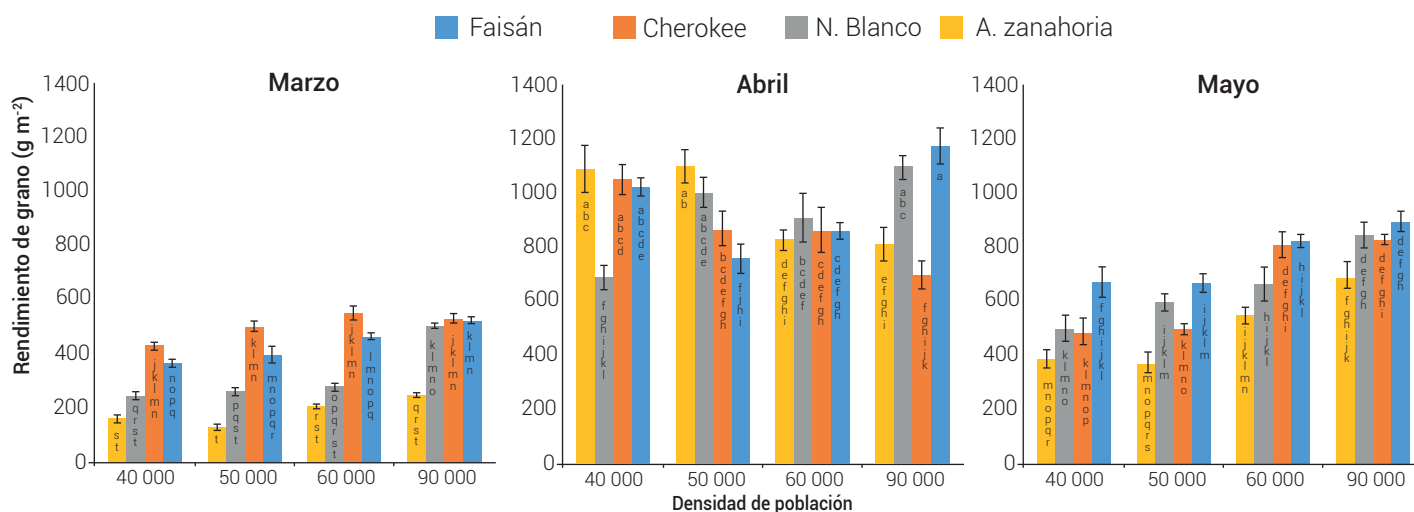


Figura 2. Rendimiento de grano para la triple interacción genotipos x densidades de población x fechas de siembra en Toluca, México.

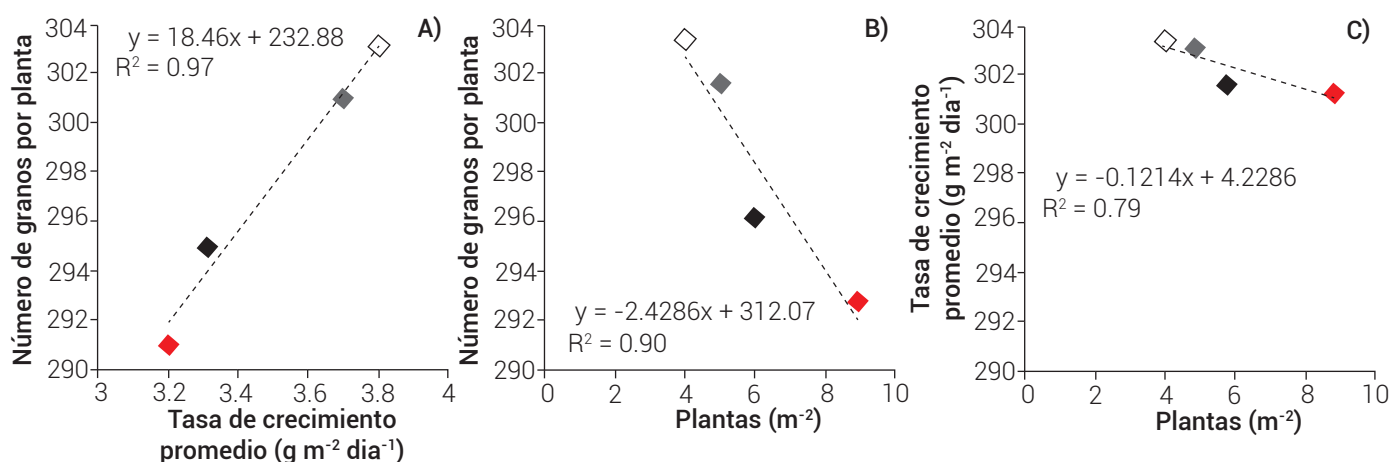


Figura 3. A) relación entre el número de granos por planta y la tasa de crecimiento promedio, B) relación entre el número de granos por planta y la densidad de plantas por m² y C) relación entre la tasa de crecimiento promedio y la densidad de plantas por m². Densidad de plantas por m²: ◇ indica 4 plantas, ◆ 5 plantas, ◆ 6 plantas y ◆ 9 plantas.

tasa de crecimiento promedio máxima de respuesta para el número de granos por planta fue de (4 g m⁻² día⁻¹); los mismos autores concluyen que a una tasa de crecimiento promedio mayor a 4 g m⁻² día⁻¹ no se produjeron incrementos en el número de granos por mazorca.

La relación entre el rendimiento de grano y el índice ambiental se presenta en la Figura 4. Resalta la estabilidad del genotipo Faisán en las 12 combinaciones posibles. Por otra parte, se aprecia que el maíz sembrado en la fecha de marzo bajo las cuatro densidades de población se ubicó en un índice ambiental negativo, así como las densidades de 40 y 50 mil plantas ha⁻¹ del maíz sembrado en la fecha de mayo. Contrariamente, las cuatro densidades

del maíz sembrado en abril y las densidades de 60 y 90 plantas ha⁻¹ del maíz sembrado en el mes de mayo se ubicaron en un índice ambiental positivo. De acuerdo con los resultados reportados por Tadeo *et al.* (2015), al utilizar una densidad de población de 60 mil plantas ha⁻¹, los mayores rendimientos se presentaron en la primera fecha de siembra del 17 de mayo, que corresponde a uno de los dos ambientes positivos observados en el mismo mes. Nuestros resultados también coinciden parcialmente con aquellos observados por Martínez *et al.* (2018), quienes, al utilizar una densidad de población de 95 mil plantas ha⁻¹, reportan que en la fecha de siembra del 13 de abril se obtiene el mayor rendimiento de grano, resultado similar al obtenido en la primera semana de abril

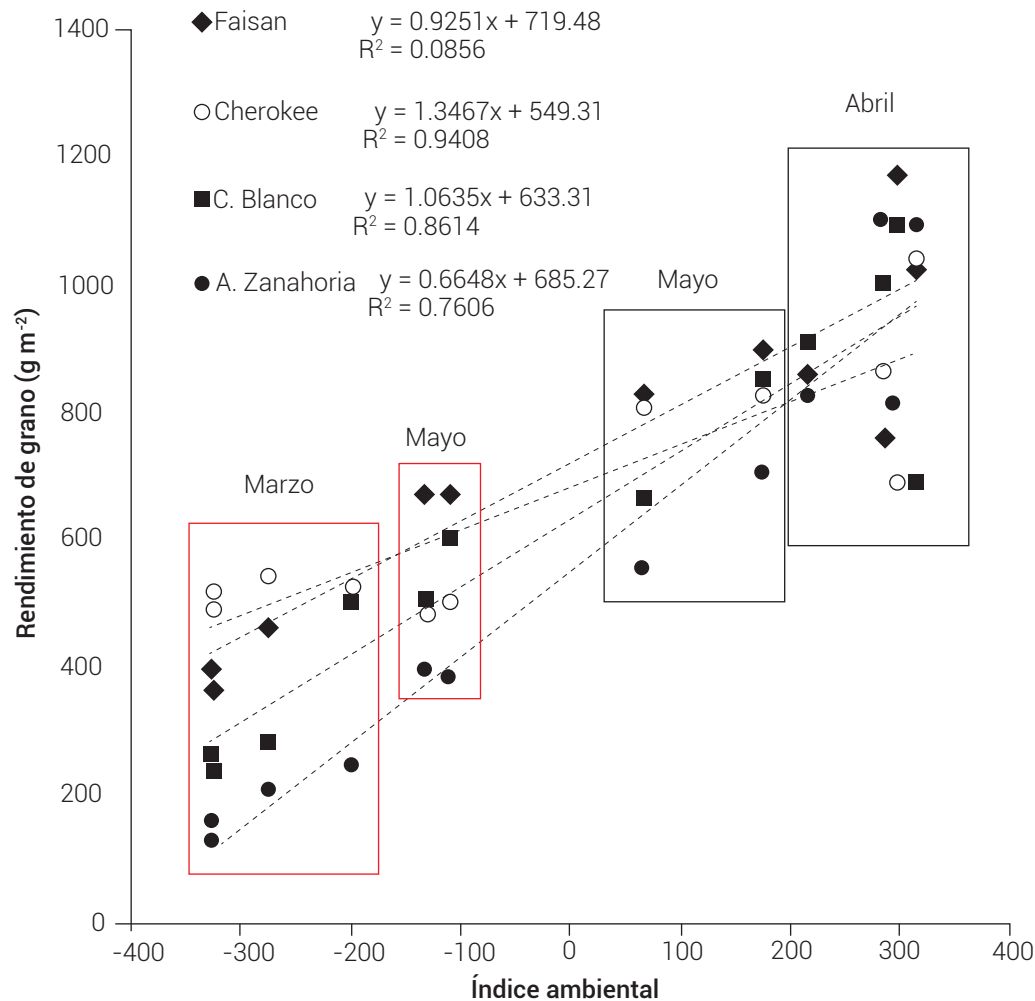


Figura 4. Relación entre el rendimiento de grano e índice ambiental para cuatro genotipos de maíz en tres fechas de siembra en Toluca, México. Los recuadros rojos indican índices ambientales negativos y los negros índices ambientales positivos.

en la densidad de 90 mil plantas por ha⁻¹ empleada en la presente investigación.

CONCLUSIONES

Al estudiar el impacto del manejo agronómico y las condiciones ambientales sobre los determinantes del rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos e híbridos de Valles Altos se concluye que, a) en fechas de siembra temprana (marzo) disminuir la densidad de población y el uso de genotipos estables permite aprovechar de mejor manera los recursos disponibles para el cultivo y b) en la fecha de siembra intermedia (abril) y tardía (mayo) el aumento en la densidad de población y el uso de genotipos estables o genotipos adaptados al ambiente incrementa el rendimiento de grano.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade F. H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero and O. Valentinuz (1999) Kernel number determination in maize. *Crop Science* 39:453–459.
- Andrade F. H., M. E. Otegui, A. Cirilo and S. Huat (1996) Ecofisiología del cultivo de maíz. La Barrosa. Balcarce, Buenos Aires. 292 p.
- Andrade F. H., M. E. Otegui, A. Cirilo y S. Huat (2023) Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. MAIZAR, Buenos Aires, Argentina. 481 p.
- ASGROW, Marca global de semillas de maíz, sorgo y soya (2022) Catálogo de productos. https://www.asgrow.com.mx/es-mx/productos/maiz/product-detail-template.html/faisan-valles_altos_altos.html (Mayo 2025).
- ASPROS, Asociación de productores de semillas (2022) Catálogo de productos de Valles Altos, <https://asprosemillas.com/wp-content/uploads/2022/04/Valles-Altos-2022.pdf>. (Mayo 2025).
- Baum M. E., M. A. Licht, I. Huber and S. V. Archontoulis (2020) Impacts of climate change on the optimum planting date of different maize genotypes in the central US Corn Belt. *European Journal of Agronomy* 119: 1–15, doi:10.1016/j.eja.2020.126101
- Deines J. M., R. Patel, S. Z. Liang, W. Dado and D. B. Lobell (2021) A million kernels of truth: Insights into scalable satellite maize yield mapping and yield gap analysis from an extensive ground

- dataset in the US corn belt. *Remote Sens. Environ* 253: 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112174>
- Desloires J., D. Ienco and A. Botrel (2023) Out of year corn yield prediction at field-scale using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning methods. *Comput. Electron. Agric* 209: 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107807>
- Djaman K., S. Allen, S. D. Djaman, K. Koudahe, S. Irmak, N. Puppala... and V. S. Angadi (2022) Planting date and plant density effects on maize growth, yield and water use efficiency. *Environ. Chall.* 6: 1- 11, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100417>
- Duvick D. N. (2005) The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advance in Agronomy* 86: 83-145.
- Echarte L., F. H. Andrade, C. R. C. Vega, and M. Tollenaar (2004) Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Science* 44: 1654-1661.
- Espinosa C. A., R. M. Tadeo, F. A. Turrent, M. M. Sierra, M. N. Gómez y G. B. Zamudio (2013) Rendimiento de variedades precoces de maíz grano amarillo para Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana* 2: 1 93-99, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43726204005>
- García E. (1988) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF. 246 p.
- González A., J. Sahagún, L. M. Vázquez, J. E. Rodríguez, D. J. Pérez, A. Domínguez... and A. Balbuena (2009) Identificación de variedades de maíz sobresalientes considerando el modelo AMMI y los índices de Eskridge. *Agric. Téc. Méx.* 35: 2 189-200.
- Herrera J. D. F., V. M. B. Gómez, R. E. C. Camacho, I. R. P. León and P. D. J. Conrado (2026) Características productivas del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante la modelación de DSSAT, frente al cambio climático en diferentes densidades de siembra en época lluviosa. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando* 7: 21-59, <https://doi.org/10.60100/rcmg.v7i1.903>
- ICAMEX, Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicola y Forestal (2025) Tríptico, <https://icamex.edomex.gob.mx/publicaciones> (Mayo 2025).
- Littell C., A. Milliken, W. Stroup and D. Wolfinger (1996) SAS® System for mixed models. SAS Institute Inc. Cary, USA. 633 p.
- Maddonni G., M. A. Parco and D. H. Rotili (2021) Manejo de la estructura del cultivo de maíz en ambientes marginales de la Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. *Agronomía y Ambiente* 41: 90-105.
- Maltense N. E., C. I. Michelin y R. J. M. Melchiori (2022) Densidad y mecanismos de plasticidad para el maíz en escenarios climáticos inciertos. Serie Extensión INTA Paraná N° 89. pp 68-75.
- Martínez G. A., G. B. Zamudio, R. M. Tadeo, C. A. Espinosa, G. J. C. Cardoso, C. Vázquez y F. A. Turrent (2018) Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9: 1447-1458, <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>
- Massigoge I., F. Ross, J. A. Fernandez, L. Echarte, I. A. Ciampitti and A. Cerrudo (2022) Contribution of tillers to maize yield stability at low plant density. *Crop Science* 62: 2451-2461, <https://doi.org/10.1002/csc2.20827>
- Otegui M. E. y J. L. Mercau (2021) Fecha de siembra y rendimiento de maíz en ambientes con provisión hídrica contrastante de la región central de Argentina. *Anales de la ANAV*, tomo LXXI. pp 150-160, <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/127399>
- Otegui M. E., M. G. Nicolini, R. A. Ruiz and P. Dodds (1995) Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33.
- Papucci S. P., A. González and M. Cruciani (2022) Efecto del daño foliar y el ambiente sobre el rendimiento en el cultivo de maíz. *Ciencias Agronómicas* 34: e001, <https://doi.org/10.35305/agro34.225>
- Quiroz M. J., L. D. de J. Pérez, H. A. González, A. M. Rubí, R. F. Gutiérrez, M. J. R. P. Franco y D. J. F. Ramírez (2017) Respuesta de 10 genotipos de maíz a la densidad de población en tres localidades del centro mexiquense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 1521-1535.
- Sáez C. A., G. D. Morales, M. R. Gordon, V. J. Jaén, B. J. Franco and M. F. Ramos (2024) Sensitivity of the corn (*Zea mays* L.) crop to different periods of controlled water deficit. *Agronomía Mesoamericana* 35: 55660, <https://dx.doi.org/10.15517/am.2024.55660>
- Tadeo R. M., G. B. Zamudio, C. A. Espinosa, F. A. Turrent, M. A. L. Cárdenas, L. C. López... and B. R. Valdivia (2015) Rendimiento de maíces nativos e híbridos en diferente fecha de siembra y sus unidades calor. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 33-43.
- Tollenaar M. and E. A. Lee (2002) Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research* 75: 161-169.