

Efecto de la densidad de población y la fertilización sobre la productividad del agua y rendimientos de híbridos de maíz en el Valle de México Population density and fertilization effect on water productivity and yield of corn hybrids in the Mexico Valley

Homero Alonso-Sánchez¹ , Margarita Tadeo-Robledo^{1*} , Alejandro Espinosa-Calderón² , Job Zaragoza-Esparza¹ , Consuelo López-López¹ , Benjamín Zamudio-González² , Alan Monter-Santillán¹ , Antonio Turrent-Fernández² , Israel Arteaga-Escamilla¹ y Karina Mora-García¹

¹ Ingeniería Agrícola de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM. Carretera Cuautitlán-Teoloyucan km 2.5, Col. San Sebastián Xhala. 54700 Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México.

* Autora para correspondencia (tadeorobledo@yahoo.com)

² Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Los Reyes-Tezcoco km 13.5, Coatlinchán. 56250 Texcoco, Estado de México, México.

Editor de Sección: Luis G. Hernández Montiel

RESUMEN

La insuficiencia alimentaria en maíz, la crisis de agua y fertilizantes a nivel mundial, demandan incrementar la eficiencia en el uso de recursos incrementando o conservando la producción. El objetivo del trabajo fue definir la respuesta de cuatro híbridos de maíz blanco (Tlaoli Puma, Atziri Puma, H-49 AE y H-47 AE) en dos ambientes con dos densidades de población y dos dosis de fertilización y testigo sin fertilizar. Como arreglo factorial, en los ambientes Cuautitlán (FESC-UNAM) y Texcoco (CEVAMEX), Estado de México, se evaluaron los híbridos con dos densidades de siembra ($D_1=75\ 000$; $D_2=90\ 000$ plantas ha^{-1}) y tres tratamientos de fertilización ($F_1=160-80-00$, $F_2=120-40-00$, $F_3=00-00-00$). El experimento en bloques completos al azar se conformó con los tratamientos y la combinación de los factores $2 \times 4 \times 2 \times 3$ establecidos en tres repeticiones. Las medias se compararon con el método Tukey ($P < 0.05$). Para el rendimiento de grano y productividad del agua, en la FESC-UNAM con menor agua total, resultaron de $5.96\ Mg\ ha^{-1}$ y $1.29\ kg\ m^{-3}$ en CEVAMEX $4.76\ Mg\ ha^{-1}$ y $0.5\ kg\ m^{-3}$; el híbrido Atziri Puma sobresalió con $6.52\ Mg\ ha^{-1}$ y $1.09\ kg\ m^{-3}$. No se observó efecto significativo de la densidad de siembra y D_1 resultó con $5.32\ Mg\ ha^{-1}$ y $0.9\ kg\ m^{-3}$ contra D_2 con $5.4\ Mg\ ha^{-1}$ y $0.9\ kg\ m^{-3}$. En la fertilización, F_1 fue superior estadísticamente con $5.64\ Mg\ ha^{-1}$ y $0.94\ kg\ m^{-3}$, pero no hubo diferencia entre F_2 ($5.24\ Mg\ ha^{-1}$ y $0.88\ kg\ m^{-3}$) y el control F_3 ($5.19\ Mg\ ha^{-1}$ y $0.87\ kg\ m^{-3}$). Se presentó interacción de los ambientes con los híbridos y destacó el híbrido Atziri Puma en la FESC-UNAM ($7.3\ Mg\ ha^{-1}$ y $1.58\ kg\ m^{-3}$). El sitio FESC-UNAM tiene potencial productivo en condiciones de temporal con los híbridos Puma e INIFAP.

Palabras clave: agua total, riego convencional, riego más precipitación, temporal.

SUMMARY

Food insufficiency in corn and water and fertilizer crisis worldwide demand efficiency in the use of resources, increasing or conserving production. Thus, the objective of this research is to explore the response of four white maize hybrids released for valles Altos in two environments considering two population densities, two doses of fertilization and an unfertilized control group. Hybrids were evaluated in a factorial arrangement in Cuautitlan (FESC-UNAM) and Texcoco (CEVAMEX),



Cita recomendada:

Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zaragoza-Esparza, J., López-López, C., Zamudio-González, B., ... Mora-García, K. (2023). Efecto de la densidad de población y la fertilización sobre la productividad del agua y rendimientos de híbridos de maíz en el Valle de México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-15. e1577. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1577>

Recibido: 3 de mayo de 2022.
Aceptado: 5 de agosto de 2022.
Artículo. Volumen 41
Enero de 2023.

Mexico State, at two planting densities ($D_1 = 75,000$; $D_2 = 90,000$ plants ha^{-1}) with three fertilization treatments ($F_1 = 160-80-00$, $F_2 = 120-40-00$, $F_3 = 00-00-00$). The completely randomized block design experiment was made up of the treatments and the combination of the factors $2 \times 4 \times 2 \times 3$ established in three repetitions. The means were compared with Tukey's test ($P < 0.05$). In FESC-UNAM with less total water, the result of grain yield and water productivity was $5.96 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $1.29 \text{ kg } m^{-3}$ in CEVAMEX $4.76 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $0.5 \text{ kg } m^{-3}$; the Atziri Puma hybrid stood out with $6.52 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $1.09 \text{ kg } m^{-3}$. No significant effect of planting density was observed and D_1 resulted with $5.32 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $0.9 \text{ kg } m^{-3}$ versus D_2 with $5.40 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $0.9 \text{ kg } m^{-3}$. In fertilization F_1 was statistically higher with $5.64 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $0.94 \text{ kg } m^{-3}$. Nevertheless, no difference was observed between F_2 ($5.24 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $0.88 \text{ kg } m^{-3}$) and the control F_3 ($5.19 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $0.87 \text{ kg } m^{-3}$), which showed the interaction of the environments with hybrids, of which Atziri Puma stood out at FESC-UNAM ($7.3 \text{ Mg } ha^{-1}$ and $1.58 \text{ kg } m^{-3}$). The FESC-UNAM site has productive potential under rainfed conditions with the Puma and INIFAP hybrids.

Index words: *total water, conventional irrigation, irrigation plus precipitation, temporary.*

INTRODUCCIÓN

Para el cultivo de Maíz, en México la información del SIAP (2022) indica que la superficie bajo temporal alcanzó 7.6 millones de hectáreas en 1994 y desde entonces ha descendido hasta las 5.5 en 2019, afortunadamente el rendimiento promedio se ha incrementado de $1.52 \text{ Mg } ha^{-1}$ en 1994 a 5.5 en 2019. En cambio, la superficie bajo riego se ha incrementado de 0.9 millones de ha en 1990 a 1.6 millones en 2019 con incremento del rendimiento promedio de 3.55 a $8.85 \text{ Mg } ha^{-1}$. En ese periodo, en los valles altos de México (zona que comprende el estado de Tlaxcala y parte del Estado de México, Hidalgo, Puebla y Querétaro) se ha notado la reducción en superficie sembrada de maíz de 1.8 a 1.4 millones de hectáreas; además, el rendimiento promedio en el Estado de México no ha sobrepasado las $2 \text{ Mg } ha^{-1}$; Tlaxcala y Puebla no han pasado de $5 \text{ Mg } ha^{-1}$, en cambio el estado de Hidalgo y Querétaro han alcanzado más de $8 \text{ Mg } ha^{-1}$ (SIAP, 2022).

Con la inercia en los últimos años en el desabasto de maíz, el incremento en la demanda del grano, la tendencia de las políticas públicas, la escasez de recursos entre ellos el agua y los fertilizantes como consecuencia de la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2, así como el incremento considerable de los sucesos recientes entre Rusia y Ucrania, el reto es mayor; incrementar o sostener los rendimientos por unidad de superficie, pero con cantidad menor de insumos.

En México las investigaciones sobre maíz datan desde 1943, en las diferentes instituciones públicas, en valles altos, instituciones públicas liberan materiales con iguales o superiores rendimientos a los de las compañías semilleras privadas (Gómez-Montiel *et al*, 2013; Espinosa-Calderón *et al*, 2018; Zamudio-González *et al*, 2018). En esta zona agroecológica, se realizan investigaciones de las variables y parámetros de los materiales genéticos, del suelo, del clima, del manejo agronómico del cultivo y de sus interacciones para conocer la respuesta específica de los híbridos debido a que las condiciones de altitud, clima y suelo de los valles altos son heterogéneas (Velázquez-Cardelas, González-Huerta, Pérez-López y Castillo-González, 2018).

La prueba de materiales con variaciones de densidad de plantación y dosis de fertilización se ensayan con la finalidad de optimizar recursos. En el caso de la densidad de población existe un máximo efecto en el incremento del rendimiento y se relaciona con la disponibilidad de recursos agua, luminosidad y suelo (Blanco-Valdés y González-Viera, 2021); en muchos casos la combinación óptima de esos factores interactúa con los materiales genéticos (Martínez-Gutiérrez, *et al*, 2018; Su,

Ahmad, Ahmad y Han, 2020), pero aún en condiciones de buena disponibilidad de humedad mediante riego por goteo en maíz no existe efecto en el rendimiento al establecer densidades entre 90 y 135 mil plantas ha⁻¹ (Guevara-Escobar, Barcenas-Huante, Salazar-Martínez, González-Sosa y Suzán-Azpiri, 2005). La expresión de los genotipos también inserta variabilidad en la respuesta, así Quevedo, Beltrán y Barragán-Quijano (2018) no encontró efecto significativo con densidades superiores a 87 mil plantas ha⁻¹ en cambio la densidad menor rindió más, relacionado con el ahijamiento mayor. En cambio, Chura, Mendoza-Cortez y De la Cruz (2019) reportaron rendimiento mayor con incremento de la densidad en los híbridos de maíz. En condiciones adversas de clima conviene incrementos ligeros de densidad para una respuesta paralela en rendimiento; a medida que se dispone de fertilización también es factible incrementar la densidad (Zamudio-González, Tadeo-Robledo, Espinosa-Calderón, Martínez-Rodríguez, Turrent-Fernández, 2016).

En adición al manejo de la densidad, la nutrición como un aporte de energía y materia es determinante en la respuesta agronómica de las plantas cultivadas, sin embargo, Navarro y Navarro (2013) mencionan que, aun con la disponibilidad de los nutrimentos en el perfil del suelo, la restricción de humedad y otros elementos del clima y del suelo limitan su aprovechamiento, como en el caso del nitrógeno donde la humedad óptima del suelo se requiere entre 12 y 18% variando según la textura, aun así, la cantidad y oportunidad de las aplicaciones son determinantes, encontrando óptimos entre 250 y 300 kg ha⁻¹ de nitrógeno para la agricultura convencional (Steduto, Hsiao y Fereres, 2012; Su *et al.*, 2020); incluso Guevara-Escobar *et al.* (2005) y Su *et al.* (2020) reportan una alta eficiencia de la fertilización nitrogenada con 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno en el rendimiento de los híbridos de maíz con régimen de humedad constante en riego por goteo con densidades superiores a 90 mil plantas ha⁻¹. Existe un efecto diferencial en la producción a través del tiempo debido a la precipitación, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes en la solución acuosa del suelo (Velázquez-Cardelas *et al.*, 2018). El bajo uso de fertilizantes en los valles altos por la predominancia de agricultura de temporal (SIAP, 2022), ha llevado a hacer recomendaciones como el incremento de densidad cuando no hay aporte de fertilizantes y, en el caso del nitrógeno, se recomienda aportarlo anualmente para mantener las condiciones de producción (Zamudio-González *et al.*, 2016).

Se ha reportado que la respuesta de los híbridos por región no presenta una relación estrecha entre densidad, fertilización y rendimiento; por lo cual es necesario caracterizarlos por zona. El objetivo de este trabajo fue identificar la respuesta de cuatro híbridos de maíz blanco en dos ambientes con dos densidades de siembra, dos dosis de fertilización y testigo sin fertilizar. La hipótesis consistió en que si en los ambientes se incrementa la densidad de siembra y se aplica fertilización con nitrógeno y fósforo entonces se incrementa la productividad del agua total y el rendimiento de los híbridos de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios Experimentales

El experimento se estableció en 2019 en la cuarta semana del mes de junio en dos ambientes del Estado de México ubicados dentro de la zona agroecológica de los valles altos de México; Rancho Almaraz de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC-UNAM), en Cuautitlán Izcalli a 2 250 m de altitud, 19° 41' 49" N y 99° 41' 36" O y Campo Experimental del Valle de México (CEVAMEX) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en el municipio de Texcoco a 2 261 m de altitud, 19° 29' 29" N y 98° 54' 29" O. En el primer ambiente no se dispuso de agua para riego, en secano ingresaron 460 mm de lluvia total en el periodo de junio a octubre con presencia de sequía mayor entre julio y agosto;

en el segundo ambiente, con disponibilidad de agua para riego y mediante manejo convencional se aplicó riego para la germinación y tres de auxilio con la cantidad total de 335 mm, la lluvia total aportó 603 mm para sumar en conjunto 938 milímetros.

El suelo en la FESC-UNAM es phaeozem vértico de textura franco-arcillosa (Flores-Román, Aguilera-Herrera y Flores-Delgadillo, 1981) y en CEVAMEX es vertisol háplico de textura arcillosa (Albino-Garduño *et al.*, 2016). La caracterización físico-química de los suelos de la FESC-UNAM y CEVAMEX fueron respectivamente: conductividad hidráulica de 3.5 y 2.1 cm h⁻¹; materia orgánica 1.95 y 0.68%; texturas de franco-arcilloso y arcilloso; densidad aparente de 1.02 y 1.0 g cm⁻³; capacidad de campo de 25.6 y 34.9 %; punto de marchitamiento permanente de 15.2 y 16.4%; porosidad de 48 y 50%; pH 7.2 y 5.4 unidades; CIC de 18.2 y 9.6 cmol kg⁻¹ SS; CE de 0.55 y 0.23 dS m⁻¹; N-NO₃ de 18.4 y 8.6 mg kg⁻¹ y P-Bray de 151 y 38 mg kg⁻¹. En la FESC-UNAM el suelo es de alta capacidad de almacenamiento de agua, pero con movimiento vertical alto cuando está saturado, capacidad de almacenamiento de nutrientes alta libre de carbonatos y sales, contenido medio de materia orgánica y muy alto suministro de fósforo disponible. En CEVAMEX el suelo presenta alta capacidad de almacenamiento de agua, movimiento vertical medio a saturación, contenido bajo de materia orgánica y fósforo disponible.

Material y Diseño Experimental

En los dos ambientes, el experimento evaluó la respuesta de los híbridos Tlaoli Puma, Atziri Puma, H-49 AE y H-47 AE con dos densidades (D₁=75 mil y D₂=90 mil plantas ha⁻¹) y tres fórmulas de fertilización con nitrógeno y fósforo (F₁=160-80-00, F₂=120-40-00 y F₃=00-00-00) con fosfato monoamónico y urea como fuentes en una sola aplicación en la capa superficial a la siembra. La combinación de los factores 2A × 4H × 2D × 3F=48 tratamientos, se implementaron en unidades experimentales (UE) uniformes de largo 5.0 m y ancho 0.80 m como un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones.

El terreno se preparó de manera convencional con un paso del arado de discos, dos pasos de rastra cruzada y el paso de la surcadora. La siembra se realizó en seco de forma manual; en cada UE se distribuyeron uniformemente 50 semillas en la distancia de 5 m; en la etapa V3 se aclareó a 75 mil plantas ha⁻¹ para D₁ y 90 mil plantas ha⁻¹ para D₂. La humedad de germinación fue por precipitación en la FESC-UNAM y por riego en CEVAMEX. El experimento se mantuvo libre de malezas, insectos y enfermedades utilizando control químico.

VARIABLES RESPUESTA

En campo se registraron las floraciones masculinas (FM) y femenina (FF), también se registró la altura de planta (ALP) medida desde la rasante del terreno hasta la hoja bandera, la altura de mazorca (ALM) medida desde la rasante del terreno hasta el nudo de inserción de la mazorca superior. La cosecha se realizó en el mes de diciembre de 2019. En cada UE se recolectaron manualmente todas las mazorcas para obtener el peso de campo (PC); como muestra, cinco se seleccionaron con sanidad adecuada y características comerciales para la caracterización de la mazorca e identificar las variables de productividad y rendimiento.

En laboratorio utilizando un vernier se midió la longitud de mazorca (LM) desde la base hasta el último grano de la punta; por conteo, las hileras por mazorca (HM) y el número de granos por hilera (GH) y el peso por hectolitro (PH) con el equipo DICKEY-Jhon modelo GAC 2100. Se calcularon: el porcentaje de grano (%G), el número de granos por mazorca (GM) y el porcentaje de materia seca (MS). El rendimiento de grano (RG) se determinó con la expresión que utilizaron Alonso-Sánchez, Tadeo-Robledo, Espinosa-Calderón, Zaragoza-Esparza y López-López (2020) como:

$$RG = PCxMSxGxFCx1.14 \quad (1)$$

Donde; RG es el rendimiento de grano en Mg ha⁻¹, PC es el peso completo del total de las mazorcas cosechadas en la unidad experimental en toneladas, MS es la materia seca en fracción decimal, G es la fracción de grano respecto al peso completo de mazorca, FC es el factor de conversión para inferir el rendimiento por hectárea, 1.14 es el factor para convertir el rendimiento de materia seca de grano al rendimiento con 14% de humedad comercial.

La productividad del agua que considera únicamente el agua de riego puede enmascarar el efecto de la precipitación (González-Robaina, Herrera-Puebla, López-Seijas y Cid-Lazo, 2014). En esta investigación se identificó la productividad del agua total (PAT) relacionando el rendimiento de grano con el agua total (AT) empleada. El AT en CEVAMEX consistió en el volumen por riego (AR), que se determinó con aforo del caudal y tiempo de riego, más el volumen total de agua de precipitación (AP) que se registró durante todo el ciclo del cultivo en la estación Chapingo (15170) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN): en la FESC-UNAM el AT sólo contabilizó el agua por precipitación de la estación FES-Cuautitlán (15043). La PAT se identificó como:

$$PAT = \frac{RG}{AT} \quad (2)$$

Donde; PAT es la productividad del agua total en kg m⁻³, RG es el rendimiento de grano en kg ha⁻¹ y AT es el agua total que ingresó al experimento en m³ ha⁻¹.

Los análisis de varianza (ANDEVA) y la verificación de los supuestos se realizaron en SAS 9.0 (SAS Institute, 2002). La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ANDEVA factorial identificó efecto significativo del ambiente ($P < 0.05$), (Cuadro 1) en siete de las variables respuesta. El factor híbrido mostró efecto significativo en todas las variables respuesta; la densidad sólo afectó en la altura de mazorca y la fertilización afectó en rendimiento de grano y productividad del agua total. Las interacciones significativas fueron ambientes con híbridos (A × B) en ALP, ALM, LM, GH, G/M, PH y ambientes con densidades (A × C) para ALP, ALM.

Los promedios de las primeras cuatro variables que se identificaron en campo como; la floración masculina y femenina fueron precoces con 76 y 79 días con un periodo promedio de tres días entre una y otra lo que favorece la disponibilidad de polen para la fecundación, la altura de planta y de mazorca con 212 y 110 cm son adecuadas para la cosecha manual y mecanizada; las alturas son muy próximas a las que reportan Espinosa-Calderón, Tadeo-Robledo y Tapia-Naranjo (2000) para híbridos no convencionales que se obtienen a partir de combinación de variedades nativas de valles altos, además, los días a floración menores se relacionan con la respuesta de los híbridos modernos a factores como la disponibilidad de agua total (Kibet-Serrem, López-Castañeda y Kohashi-Shibata, 2009).

La longitud de mazorca y su número de hileras resultaron con promedios de 14 cm y 16 hileras respectivamente, también se identificaron promedios de 28 granos por hilera y 433 granos totales. Los resultados anteriores son inferiores a otras investigaciones donde se han estudiado estos mismos híbridos y se han presentado ingresos de agua por precipitación superiores a los 830 mm (López-López *et al.*, 2017; Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018). La explicación de estos resultados se relaciona con la disponibilidad de humedad en los ambientes ya que durante el desarrollo del experimento se presentó la canícula en un periodo mayor a un mes.

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia de once variables respuesta en híbridos de maíz.
Table 1. Mean squares and significance of eleven response variables in corn hybrids.

FV	Variables respuesta										
	FM	FF	ALP	ALM	LM	HM	GH	G/M	PH	RG	PTA
	--- días ---		----- cm -----			----- núm -----			kg hL ⁻¹	Mg ha ⁻¹	kg m ⁻³
Ambiente (A)	160**	25	140063**	1072**	1	6*	3	1743	87**	51**	22**
Híbrido (B)	8*	9*	444*	3059**	9**	3*	77**	35599**	158**	22**	38**
Densidad (C)	1	0	171	351*	1	0.1	0.1	12	1	0.2	0.03
Fertilización (D)	4	7	292	113	2	1	22	5893	9	2*	3*
A × B	2	4	839**	399**	9**	0.9	25*	11249**	15*	1*	10**
A × C	4	1	1674**	357*	0.5	0.1	0.1	604	0.01	1	1
A × D	4	6	221	26	2	1	1	428	3	0.1	0.1
B × C	1	1	168	142	0.1	2	4	5267	3	1	3
B × D	1	1	92	103	1	1	6	1166	8	1	2
C × D	1	6	222	1	1	1	4	2361	8	2	4
A × B × C	0.8	1	77	28	0.1	2	0.2	1815	2	0.6	2
A × B × D	1	1	125	18	2	1	10	4003	4	1	2
B × C × D	0.4	1	29	86	0.5	0.2	2	405	3	0.4	0.8
A × B × C × D	4	4	111	28	0.4	2	3	1602	6	0.3	0.7
CV	1.8	22	5.5	7.7	8.7	6.9	10.7	11.9	3.04	15	14.5
Media	76.4	79	212.2	110.5	14	15.5	27.8	433.2	76.49	5.3	0.9

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; CV = coeficiente de variación (%); FM = floración masculina; FF= floración femenina; ALP= altura de planta; ALM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; HM= hileras por mazorca; GH = granos por hilera; GM = granos por mazorca, PH = peso hectolítrico; RG = rendimiento de grano; PAT = productividad del agua total.

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; CV = coefficient of variation (%); FM = male flowering; FF = female flowering; ALP = plant height; ALM = ear height; LM = ear length; HM = rows per ear; GH = grains per row; GM = grains per ear; PH = hectoliter weight; RG = grain yield; PAT = total water productivity.

El peso hectolítrico resultó de 76 kg hL⁻¹, el rendimiento de grano y productividad del agua total resultaron de 5.36 Mg ha⁻¹ y 0.9 kg m⁻³. El rendimiento de grano y la productividad del agua resultaron bajos debido a que, la principal fuente de agua fue la lluvia y durante el ciclo del cultivo se presentó sequía en el mes de agosto y déficit hídrico en septiembre y octubre que coincidió con la floración y llenado de grano. El rendimiento y la productividad del agua fueron menores a los valores promedio de 6 Mg ha⁻¹ y 1.2 kg m⁻³ que reportaron Doorembos y Kassam (1979) para diferentes países en una diversidad de condiciones de suelo y clima; asimismo, resultaron menores a los que reportaron González-Robaina *et al.* (2014) de 6.1 Mg ha⁻¹ y 1.7 kg m⁻³ para maíz cultivado bajo manejo de riego en suelo ferralítico y Alonso-Sánchez *et al.* (2020) para un experimento similar con tratamientos de densidad de siembra en el valle de México en un periodo más lluvioso (780 mm) con rendimiento 8.1 Mg ha⁻¹ y productividad 0.99 kg m⁻³. López-Hernández, Arteaga-Ramírez, Ruíz-García, Vázquez-Peña y López-Rosano (2019) también reportaron valores de rendimiento de 5.2 Mg ha⁻¹ y productividad de 1.8 kg m⁻³ del híbrido Aspro 823 con fertilización y bajo secano para el valle de Texcoco, sin embargo, en este último caso se empleó la precipitación efectiva (289 mm) para el cálculo de la productividad del agua lo que incrementó este indicador.

Comparación de Medias por Factor

El Cuadro 2 presenta los resultados promedio de cada factor donde se observa que las floraciones masculina y femenina fueron más precoces (75.3 y 78.6 días) e inferiores con menor disponibilidad de agua en la FESC-UNAM con respecto al CEVAMEX (77.4 y 79.4 días) donde, con más agua total, se observó un retraso de la floración masculina; la precocidad se relaciona con la disponibilidad de humedad como una estrategia para evadir el estrés por déficit de agua en el suelo; esta respuesta coincide con lo que describen Alonso-Sánchez *et al.* (2020) para experimentación con híbridos de maíz en condiciones similares a las del estudio presente, aunque las floraciones contrastan con los resultados que reportaron López-López *et al.* (2017) con manejo agronómico similar para líneas de híbridos, en los que la floración mostró precocidad mayor en CEVAMEX, posiblemente relacionado con la etapa fenológica en la que se presentó el déficit de agua durante el experimento de este trabajo.

Las alturas de planta y de mazorca (243 y 113 cm) fueron mayores en CEVAMEX, donde ingresó más agua total, esta respuesta también las reportaron López-López *et al.* (2017) para líneas de híbridos y Tadeo-Robledo *et al.* (2014) para H-49 AE y H-47 AE; en estos estudios también se presentó disponibilidad de humedad mayor en CEVAMEX, lo que da evidencia que el agua total mayor propicia desarrollo mayor de la planta. Los resultados de estas variables son útiles para proceso de mejoramiento considerando el efecto de la disponibilidad de humedad en las variables agronómicas al realizar selección de las características más deseables.

Las características de la mazorca resultaron mayores en FESC-UNAM con longitud (14.1 cm), número de hileras (16) y granos totales (436), pero menores a los reportados en otros trabajos desarrollados en el Estado de México donde se ha experimentado con estos híbridos (López-López *et al.*, 2017; Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018).

Las variables de rendimiento (Cuadro 2); peso hectolítrico resultó superior en la FESC-UNAM con 77.2 kg hL⁻¹ porque las condiciones de déficit hídrico propician

Cuadro 2. Medias de once variables agronómicas para sitios e híbridos de maíz.
Table 2. Means of eleven agronomic variables for sites and hybrids.

Fuentes de variación	Variables respuesta											
	FM	FF	ALP	ALM	LM	HM	GH	G/M	PH	RG	PAT	
	----- días		----- cm			----- núm.		----- kg hL ⁻¹		----- Mg ha ⁻¹		----- kg m ³
AMBIENTE												
FESC-UNAM	75.3 b	78.6 b	181 b	108 b	14.1 a	15.8 a	28 a	436 a	77.3 a	5.96 a	1.29 a	
CEVAMEX	77.4 a	79.4 a	243 b	113 a	13.9 a	15.3 b	28 a	429 a	75.7 b	4.76 b	0.5 b	
DSH	0.5	0.6	3.9	2.8	0.4	0.4	0.9	17	0.8	0.26	0.04	
HÍBRIDO												
Tlaoli Puma	76.8 a	79.3 ab	214 ab	111 b	13.9 b	15.5 ab	27 b	423 b	76.6 a	5.12 b	0.85 b	
Atziri Puma	75.7 b	78.3 b	216 a	104 c	14.7 a	15.9 a	30 a	476 a	77.9 a	6.52 a	1.09 a	
H-49 AE	76.6 a	79.5 a	208 b	103 c	13.5 b	15.2 b	26 b	401 b	77.9 a	4.74 b	0.79 b	
H-47 AE	76 ab	78.9 ab	210 ab	123 a	13.9 b	15.5 ab	28 b	431 b	73.5 b	5.04 b	0.86 b	
DSH	0.9	1.1	7.3	5.3	0.7	0.6	1.8	32	1.4	0.49	0.08	

FM = floración masculina; FF = floración femenina; ALP = altura de planta; ALM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; HM = hileras por mazorca; GH = granos por hilera; GM = granos por mazorca, PH = peso hectolítrico; RG = rendimiento de grano; PAT = productividad del agua total; DSH = diferencia significativa honesta.

FM = male flowering; FF = female flowering; ALP = plant height; ALM = ear height; LM = ear length; HM = rows per ear; GH = grains per row; GM = grains per ear; PH = hectoliter weight; RG = grain yield; PAT = total water productivity; DSH = honestly significant difference.

granos más densos como también lo reportaron Zamudio-González *et al.* (2018) y Alonso-Sánchez *et al.* (2020). El peso de 75.7 kg hL⁻¹ en CEVAMEX, aunque resultó menor, está dentro del rango característico para la industrialización del maíz blanco (López-López-López *et al.*, 2017; Zamudio-González *et al.*, 2018). En la FESC-UNAM con peso mayor de granos se traduce directamente en rendimiento mayor de 6.21 kg ha⁻¹ y productividad del agua total de 1.35 kg m⁻³, estos resultados fueron mayores a los correspondientes en CEVAMEX (5.09 kg ha⁻¹ y 0.53 kg m⁻³); el rendimiento menor del 18% en CEVAMEX no justifica la reducción en productividad del agua del 61% que se relaciona con la baja eficiencia al ingresar volumen mayor de agua total (precipitación y riego) en este ambiente y fue superior en 203%, pues hay una relación inversa no lineal entre lámina de agua y su efecto en la productividad. La reducción en rendimiento aun con lámina mayor de agua es posible por la baja fertilidad del suelo, además, la textura más fina del suelo en CEVAMEX propician tensiones mayores, menor disponibilidad de agua, aun con un contenido volumétrico mayor de agua; los tamaños menores de poro generan las condiciones para menor absorción de agua y nutrientes (Navarro y Navarro, 2013); además, si existe exceso de agua es posible la lixiviación de nutrientes como lo reportan López-Hernández *et al.* (2019).

Los híbridos mostraron periodos de floración precoz entre 75.7 y 79.5 días comparado con otros trabajos (Espinosa-Calderón *et al.*, 2000; López-López *et al.*, 2017) y similares a los que reportan Tadeo *et al.*, (2014) para H-49 AE y H-47 AE. Las alturas de planta y mazorca no superaron los 216 y 123 cm respectivamente; estos valores son adecuadas para las maniobras de cosecha, el porte medio permite mayor estabilidad contra el acame y estas características son distintivas de los híbridos no convencionales (Espinosa-Calderón *et al.*, 2000).

En cuanto a las características de mazorca se presentaron tres grupos para longitud, granos por hilera y granos totales. El híbrido Atziri Puma presentó rendimiento superior de 6.52 Mg ha⁻¹ y por relación directa productividad mayor del agua de 1.09 kg m⁻³; la respuesta se relaciona con el peso hectolítrico mayor, además, sobresalió significativamente en las características de la mazorca (longitud, número de hileras y granos y total de granos), también destacó en altura de planta a pesar de presentar las floraciones y altura de mazorca menores, posiblemente relacionado con las características distintivas de mejoramiento del genotipo. Estas características productivas de Atziri Puma se han observado en los trabajos de Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018) con rendimiento de grano de 12 Mg ha⁻¹ en cinco sitios de valles altos con altitud mayor a 2300 m y precipitación media superior a los 830 mm; también Alonso-Sánchez *et al.* (2020) encontraron rendimiento mayor de este híbrido (10 Mg ha⁻¹) en su evaluación en sitios de valles Altos con diferentes densidades de siembra y disponibilidad de humedad con precipitación de 730 mm. El Atziri Puma mostró rendimiento mayor en variantes de humedad, pues los híbridos no convencionales destacan en las características de rendimiento (Espinosa-Calderón *et al.*, 2000). El H-49 AE presentó el peso hectolítrico mayor, pero fue el de rendimiento y productividad menor (4.74 Mg ha⁻¹ y 0.79 kg m⁻³), esto demuestra que el PH no es la única variable determinante en la productividad de los híbridos, pues las características de la mazorca y altura de planta fueron menores para este híbrido, así lo superó en rendimiento (5.04 Mg ha⁻¹) el H-47 AE con el peso hectolítrico menor (73 kg hL⁻¹); estos híbridos de INIFAP también han resultado con rendimientos menores respecto a los materiales Puma en otros trabajos donde se han evaluado en valles altos del Estado de México (Tadeo *et al.*, 2014; Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018), pero tienen características productivas aceptables para esta región (Espinosa-Calderón *et al.*, 2018). El híbrido Tlaoli Puma mostró valores cercanos a las medias generales de las variables observadas, excepto en el número de granos por mazorca. En condiciones de restricción de humedad en el periodo reproductivo por efecto de la canícula, los híbridos Puma tienen mejor adaptación

en la FESC-UNAM y en CEVAMEX y al manejo agronómico por lo que destacan con mejores características de rendimiento en contraste con los materiales androestériles del INIFAP (H-49 AE y H-47 AE), esta respuesta es similar a lo que reportan Zamudio-González *et al.* (2018) para H-51 AE y H-57 AE que se evaluaron en valles altos del Estado de México. Aunque el rendimiento de grano es la variable más importante para el agricultor, los tomadores de decisiones en el uso y manejo del agua requieren conocer la productividad del agua para promover las acciones en el uso óptimo del recurso hídrico por región; en este sentido los híbridos Puma destacaron con valores superiores de rendimiento y productividad del agua total de Atziri Puma como también lo reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020). Estudios complementarios se deben desarrollar para relacionar la productividad con los contenidos nutricionales del grano.

Los híbridos INIFAP, H-49 AE y H-47 AE, resultaron con rendimiento y productividad menor (Cuadro 2) con respecto a los valores reportados para los mismos sitios en otros periodos con rendimiento superior a 6 Mg ha^{-1} y productividad mayor a 0.9 kg m^{-3} que identificaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020). Además, Tadeo *et al.* (2014) para estos híbridos reportaron rendimientos superiores a 6.7 Mg ha^{-1} . La razón se debe a la cantidad y variabilidad temporal de la precipitación, y el manejo agronómico que se presenta en los diferentes experimentos con estos materiales.

El factor densidad de siembra sólo mostró diferencia significativa en altura de mazorca, las variables de productividad fueron iguales estadísticamente, pero la altura de planta y mazorca fueron mayores con la densidad mayor (D_2) que coincide con lo que reportaron Blanco-Valdés y González-Viera (2021) en un experimento con híbridos de maíz y manejo de la densidad de siembra. La densidad menor (D_1) tuvo rendimiento de grano y productividad del agua de 5.6 Mg ha^{-1} y 0.94 kg m^{-3} , la densidad mayor (D_2) con 5.7 Mg ha^{-1} y 0.94 kg m^{-3} . La falta de significancia en densidad también la reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020) en los mismos híbridos con mejores condiciones de disponibilidad de humedad (730 mm de precipitación). Es posible que las características de los híbridos sean estables a variantes de densidad en un intervalo reducido con la nutrición como limitante, pero en algunas condiciones ambientales los resultados pueden diferir. En coincidencia, otros estudios con híbridos de maíz y densidades de siembra superiores a las 88 mil plantas ha^{-1} no mostraron efecto en las variables de rendimiento (Guevara-Escobar *et al.*, 2005; Blanco-Valdés y González-Viera, 2021) y se relaciona con la disponibilidad de recursos nutrimentales y agua ya que, en contraste, con buen manejo agronómico y disponibilidad de agua total mayor, Zamudio-González *et al.* (2016) y Virgen-Vargas *et al.* (2014) reportan una relación creciente del rendimiento conforme se aumenta la densidad cuando se mejora la fertilización y disponibilidad de humedad; incluso estos autores recomiendan primero incrementar la densidad y a medida que el clima sea favorable incrementar los insumos. Adicionalmente, Quevedo *et al.* (2018) no encontraron diferencia significativa en el rendimiento de dos híbridos de maíz donde las densidades utilizadas fueron superiores a 87 mil plantas ha^{-1} y la densidad más baja presentó rendimiento mayor relacionado con el ahijamiento mayor que se produjo.

El factor fertilización no mostró diferencia significativa en las medias de las variables de campo ni en las características de la mazorca (información no agregada en cuadros); sin embargo, en rendimiento de grano si hubo diferencia significativa de la fertilización mayor F_1 (5.64 Mg ha^{-1}) con respecto a la baja F_2 y la no fertilización F_3 que resultaron iguales estadísticamente con medias 5.24 y 5.19 Mg ha^{-1} respectivamente donde $\text{DSH}=0.39$. La productividad de agua total también mostró este patrón con diferencia significativa de F_1 (0.94 kg m^{-3}) respecto a F_2 y F_3 con 0.88 y 0.87 kg m^{-3} respectivamente donde la $\text{DSH}=0.06$. La dosis baja (120 kg ha^{-1}) no generó diferencia significativa con el control lo que coincide con lo que reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2022) con dosis similares de nitrógeno (160 kg ha^{-1}) en

experimentos con híbridos y ambientes de valles altos del Estado de México; la razón se relaciona con el momento en que se aplicó el nitrógeno por el posible efecto de la disponibilidad de humedad (Navarro y Navarro, 2013), sequía o exceso temporal de agua que propician pérdidas sobre todo porque la aplicación de fertilizante fue de forma manual en la capa superficial del suelo.

Interacciones

Las interacciones significativas se presentaron en los factores ambiente e híbridos (A × B) a excepción de las floraciones y el número de hileras por mazorca y para el ambiente con densidad (A × C) para altura de planta y mazorca que se relaciona directamente como un desarrollo mayor de la planta en el ambiente con agua total mayor. Las variables de producción se consideran más relevantes para el análisis de la respuesta de los híbridos (Zamudio-González *et al.*, 2018; Alonso-Sánchez *et al.*, 2020), en el Cuadro 3 se presentan las respuestas en el peso hectolítrico, rendimiento de grano y productividad del agua de las interacciones de los ambientes con los híbridos.

En el peso hectolítrico las interacciones híbrido × FESC-UNAM mostraron tres grupos de medias en cambio híbrido × CEVAMEX presentaron cuatro grupos; esta característica se debe al efecto de sitio (Zamudio-González *et al.*, 2018) como una respuesta al agua total disponible (Alonso-Sánchez *et al.*, 2022) ya que en CEVAMEX al existir más agua total disponible se presentó un intervalo de respuesta mayor en peso volumétrico.

La interacción del híbrido Atziri Puma y FESC-UNAM mostró valores mayores con peso hectolítrico de 78.4 kg hL⁻¹, rendimiento de grano de 7.3 Mg ha⁻¹ y productividad del agua de 1.58 kg m⁻³ en contraste con los valores menores 71.7 kg hL⁻¹, 4.22 Mg ha⁻¹ y 0.45 kg m⁻³ respectivamente que presentó el híbrido H-47 AE en CEVAMEX; las interacciones anteriores coinciden con lo que reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2020) en un trabajo con híbridos en el Valle de México. El resultado se relaciona con la respuesta de los genotipos según el ambiente debido a que, en trabajos sobre evaluación agronómica de los híbridos para el valle de México, el Atziri Puma ha destacado en las variables agronómicas incluso ha mostrado rendimiento mayor en sitios con precipitación superior a 730 mm, mayor a los 460 mm de este trabajo, y el H-47 AE ha mostrado desempeño menor (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018, Zamudio-González *et al.*, 2018; Alonso-Sánchez *et al.*, 2020). También inciden los factores

Cuadro 3. Comparación de medias de las variables de producción de la interacción ambiente x híbrido.

Table 3. Means production variables comparison of the environment x hybrid interaction.

HÍBRIDO	Peso hectolítrico		Rendimiento de grano		Productividad del agua total	
	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX	FESC-UNAM	CEVAMEX
	kg hL ⁻¹		Mg ha ⁻¹		kg m ⁻³	
Tlaoli Puma	77.43 ac	75.85 bc	5.50 bc	4.75 cd	1.19 bc	0.50 de
Atziri Puma	78.44 a	77.52 ac	7.30 a	5.75 b	1.58 a	0.61 d
H-49 AE	78.04 ab	77.67 ab	5.18 bc	4.31 d	1.12 c	0.46 e
H-47 AE	75.16 c	71.78 d	5.86 b	4.22 d	1.27 b	0.45 e
DSH	2.37		0.79		0.13	

Las medias con la misma letra dentro del grupo de las variables observadas son iguales estadísticamente (Tukey, $P < 0.05$); DSH = diferencia significativa honesta. The means with the same letter within the group of observed variables are statistically equal (Tukey's, $P < 0.05$); DSH = honestly significant difference.

edáficos y climáticos principalmente la textura del suelo y la distribución temporal de la precipitación durante el ciclo del cultivo ya que para este híbrido Espinosa-Calderón *et al.* (2018) reportaron características productivas medias superiores en 25 localidades distribuidas en el Estado de México y Puebla.

Comparación de Medias por Ambiente

En los dos ambientes solamente fue significativo el factor híbrido (Cuadro 4) y no se presentaron interacciones entre factores.

En la FESC-UNAM se observaron diferencias significativas en la floración masculina, el híbrido Atziri Puma resultó con precocidad mayor (74.3 días) con respecto a los otros híbridos. Las floraciones femeninas fueron iguales estadísticamente con media de 79 días. En altura de planta y mazorca sobresalió el H-47 AE (186 y 125 cm), con periodos de floración de 75.2 y 78.2 días. Las características de la mazorca fueron mejores en el híbrido Atziri Puma, además sus características de productividad fueron superiores con peso hectolítrico de 78 kg hL⁻¹, rendimiento de grano de 7.3 Mg ha⁻¹ y productividad del agua de 1.58 kg m⁻³. Los híbridos Tlaoli Puma y H-49 AE resultaron con medias de las variables de producción iguales, pero las más bajas significativamente (Cuadro 4). Los resultados de FF e HM donde no se presentó diferencia significativa se relaciona con la estabilidad de los híbridos y con la coincidencia de algunos de sus progenitores.

Cuadro 4. Comparación de medias de once variables en el ambiente FESC-UNAM.
Table 4. Eleven variables means comparison of the environment FESC-UNAM.

Fuentes de Variación	Variables respuesta										
	FM	FF	ALP	ALM	LM	HM	GH	G/M	PH	RG	PAT
	----- días -----		----- cm -----		----- núm -----				kg hL ⁻¹	Mg ha ⁻¹	kg m ⁻³
	HÍBRIDO										
Tlaoli Puma	76.0 a	79.1 a	182 a	108 b	13.6 bc	15 a	29 bc	414 bc	77 a	5.5 bc	1.19 bc
Atziri Puma	74.3 b	77.6 a	184 a	99 c	14.9 a	16 a	30 a	485 a	78 a	7.3 a	1.58 a
H-49 AE	75.8 a	79.5 a	173 b	99 c	13.2 c	15 a	25 c	390 c	78 a	5.1 c	1.12 c
H-47 AE	75.2 ab	78.2 a	186 a	125 a	14.6 ab	16 a	29 ab	458 ab	75 b	5.9 b	1.27 b
DSH	1.3	1.9	6.8	4.9	1.1	0.9	2.8	47.5	1.7	0.65	0.14
	DENSIDAD										
75000	75.0 a	78.5 a	183 a	108 a	14.1 a	16 a	28 a	438 a	77 a	6.0 a	1.30 a
90000	75.6 a	78.7 a	179 b	108 a	14.1 a	16 a	28 a	435 a	77 a	5.9 a	1.28 a
DSH	0.7	0.9	3.6	2.6	0.6	0.5	1.5	25.4	0.9	0.35	0.07
	FERTILIZACIÓN										
160-80-00	75.6 a	78.7 ab	181 a	106 a	14.2 a	16 a	28 a	445 a	78 a	6.2 a	1.34 a
120-40-00	75.7 a	79.3 a	181 a	109 a	14.0 a	16 a	27 a	421 a	77 a	5.9 a	1.28 a
000-00-00	74.6 a	77.8 b	181 a	108 a	14.0 a	16 a	28 a	444 a	77 a	5.8 a	1.26 a
DSH	1.1	1.5	5.4	3.9	0.9	0.8	2.2	37.4	1.4	0.51	0.11

FM = floración masculina; FF = floración femenina; ALP = altura de planta; ALM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; HM = hileras por mazorca; GH = granos por hilera; GM = granos por mazorca, PH = peso hectolítrico; RG = rendimiento de grano; PAT = productividad del agua total; DSH = diferencia significativa honesta.

FM = male flowering; FF = female flowering; ALP = plant height; ALM = ear height; LM = ear length; HM = rows per ear; GH = grains per row; GM = grains per ear; PH = hectoliter weight; RG = grain yield; PAT = total water productivity; DSH = honest significant difference.

La densidad de siembra no mostró efecto significativo en las variables observadas posiblemente relacionado con la disponibilidad en cantidad y oportunidad de agua y nutrientes, pero, como parte de la aleatoriedad, la densidad menor (D_1) mostró promedios mayores de rendimiento de grano de 6.0 Mg ha^{-1} y productividad del agua de 1.3 kg m^{-3} . El resultado contrasta con lo que reportaron Virgen *et al.* (2016) y Canales-Islas, Tadeo-Robledo, Mejía-Contreras, García-Zavala y Espinosa-Calderón (2017) para híbridos no convencionales bajo el manejo de densidad de siembra; esta respuesta se relaciona con la competencia por agua y nutrientes a densidad mayor.

En la FESC-UNAM las dosis de fertilización no produjeron efecto significativo en las variables de respuesta que se relacionan con la cantidad de agua total menor y con las posibles pérdidas que se presentan debido a que el fertilizante se aplicó en la capa superficial del suelo. La fertilización mayor F_1 resultó con rendimiento mayor de grano (6.2 Mg ha^{-1}) y productividad del agua (1.34 kg m^{-3}) con respecto a F_2 (5.9 Mg ha^{-1} y 1.28 kg m^{-3}) y F_3 (5.8 Mg ha^{-1} y 1.26 kg m^{-3}).

En CEVAMEX la productividad de los híbridos fue menor porque el rendimiento en promedio fue menor y el agua total mayor; el híbrido Atziri Puma mostró los promedios mayores con significancia en altura de mazorca (249.2 cm), rendimiento (5.8 Mg ha^{-1}) y productividad del agua (0.61 kg m^{-3}). Le siguieron en orden decreciente Tlaoli Puma, H-49 AE y H-47 AE (Cuadro 5). Es posible que al ingresar cantidad de agua mayor en este sitio se propicie la pérdida por percolación profunda y por escurrimiento superficial, cuando la condición de humedad antecedente

Cuadro 5. Comparación de medias de once variables en el ambiente CEVAMEX. Primavera-otoño de 2019.
Table 5. Eleven variables means comparison of the environment CEVAMEX. Spring-autumn 2019.

Fuente de Variación	Variables respuesta										
	FM	FF	ALP	ALM	LM	HM	GH	G/M	PH	RG	PAT
	----- días -----		----- cm -----			----- núm -----		----- kg hL ⁻¹ -----		Mg ha ⁻¹	kg m ⁻³
HÍBRIDO											
Tlaoli Puma	77.6 a	79.6 a	245 ab	115 ab	14.2 ab	15 a	28 ab	431 ab	76 a	4.7 b	0.50 b
Atziri Puma	77.1 a	79.1 a	249 a	110 b	14.5 a	16 a	30 a	468 a	77 a	5.8 a	0.61 a
H-49 AE	77.5 a	79.5 a	244 ab	107 b	13.8 ab	15 a	27 ab	414 b	78 a	4.3 b	0.46 b
H-47 AE	77.6 a	79.6 a	235 b	121 a	13.1 b	15 a	27 b	405 b	72 b	4.2 b	0.45 b
DSH	1.2	1.2	13.2	9.6	1.1	0.9	2.4	44.1	2.3	0.8	0.1
DENSIDAD											
75000	77.5 a	79.5 a	239 b	110 b	13.7 a	15 a	28 a	427 a	76 a	4.6 a	0.49 a
90000	77.3 a	79.3 a	248 a	116 a	14.1 a	15 a	28 a	432 a	76 a	4.9 a	0.52 a
DSH	0.6	0.6	1	5.1	0.6	0.5	1.3	23.6	1.2	0.4	0.04
FERTILIZACIÓN											
160-80-00	77.4 a	79.4 a	243 a	111 a	13.9 ab	16 a	28 a	439 a	76 a	5.1 a	0.54 a
120-40-00	77.5 a	79.5 a	239 a	113 a	13.4 b	15 a	27 a	420 a	75 a	4.6 a	0.49 a
000-00-00	77.4 a	79.4 a	248 a	115 a	14.4 a	15 a	29 a	431 a	76 a	4.5 a	0.48 a
DSH	0.9	0.9	10.4	7.5	0.8	0.7	1.9	34.7	1.8	0.6	0.06

FM = floración masculina; FF = floración femenina; ALP = altura de planta; ALM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; HM = hileras por mazorca; GH = granos por hilera; GM = granos por mazorca; PH = peso hectolítrico; RG = rendimiento de grano; PAT = productividad del agua total; DSH = diferencia significativa honesta.

FM = male flowering; FF = female flowering; ALP = plant height; ALM = ear height; LM = ear length; HM = rows per ear; GH = grains per row; GM = grains per ear; PH = hectoliter weight; RG = grain yield; PAT = total water productivity; DSH = honest significant difference.

corresponde a suelo húmedo, generando pérdidas de agua que se traducen en bajas eficiencias, además la percolación y escurrimiento propician pérdidas de nutrientes por lixiviación y arrastre que limitan el rendimiento (López-Hernández *et al.*, 2019; Navarro y Navarro, 2013). Incluso al mantener el suelo arcilloso saturado en CEVAMEX puede causar problemas de anoxia que impactan en el rendimiento. En este ambiente el nitrógeno y fósforo disponibles en el suelo fueron bajos por lo que el tratamiento sin fertilización mostró rendimiento menor respecto al mismo tratamiento en FESC UNAM.

En CEVAMEX la densidad de siembra solo mostró diferencia significativa en altura de planta donde sobresalió la densidad mayor (D_2); esta densidad tuvo el rendimiento y productividad mayor de 4.9 Mg ha^{-1} y 0.52 kg m^{-3} respectivamente. Para conocer el efecto individual de este factor se recomienda probar con densidades más espaciadas debido a que, como en este trabajo, Alonso-Sánchez *et al.* (2020) no encontraron efecto con densidades de 65 mil y 80 mil plantas ha^{-1} con híbridos de maíz en el valle de México.

A excepción de la longitud de mazorca, la fertilización no produjo efecto significativo en las variables observadas, sin embargo, el rendimiento disminuyó en conjunto con el nivel fertilización ($5.1, 4.6$ y 4.5 Mg ha^{-1}) para F_1, F_2 y F_3 respectivamente y de forma similar la productividad del agua ($0.54, 0.49$ y 0.48 kg m^{-3}). Para este factor, en estudios posteriores, también se recomienda probar con dosis más espaciadas.

La diferencia entre los dos ambientes se debe a las condiciones edáficas y la precipitación como se ha observado en otros estudios (Zamudio-González *et al.*, 2016; Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018; Velázquez-Cardelas *et al.*, 2018) debido a las propiedades físico-químicas del suelo y la disponibilidad de agua total. Se observa que en el análisis individual de los ambientes no hay interacciones y se logra separar el análisis como lo recomiendan (Zamudio-González *et al.*, 2018 y Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018).

Con esta investigación se contribuye a la generación de bases que apoyan la toma de decisiones para reducir el impacto que actualmente ha generado la crisis por falta de agua y el incremento en el precio de los fertilizantes pues no conviene invertir en fertilización en las condiciones similares a los ambientes estudiados, además, apunala la problemática sobre la falta de autosuficiencia en la producción de maíz en México que otros investigadores han planteado (Espinosa-Calderón *et al.*, 2000; Tadeo *et al.*, 2014; Zamudio-González *et al.*, 2016; Espinosa-Calderón *et al.*, 2018).

También se identifican los materiales promisorios para condiciones de restricción de humedad a través de parámetros como la productividad del agua total y su caracterización por región, con lo cual se podría mejorar el alcance de los materiales genéticos nuevos para la seguridad alimentaria en el país.

CONCLUSIONES

No se identificó efecto de la densidad de siembra en las variables agronómicas de los híbridos de maíz, pero si se presentó efecto de la fertilización alta entre ambientes.

Dentro de los ambientes, la densidad y la fertilización mayor no incrementan directamente el rendimiento ni la productividad del agua total de los híbridos y se relaciona en parte con las propiedades físico-químicas del suelo. No se recomienda fertilizar los híbridos en los ambientes estudiados con cantidad de agua total de 460 mm en la FESC-UNAM ni con 930 mm en CEVAMEX.

El agua total mayor reduce la productividad por unidad de volumen utilizado. La cantidad y oportunidad de agua es determinante en la respuesta de los híbridos estudiados, se debe caracterizar su respuesta a niveles de escasez.

El híbrido Atziri Puma tiene potencial de producción en condiciones de temporal de los valles altos de México constituyendo una alternativa para los productores que no disponen de riego.

El ambiente FESC-UNAM tiene potencial productivo en condiciones de temporal con los híbridos Tlaoli Puma, Atziri Puma, H-49 AE y H-47 AE para valles Altos y, con agua disponible para riego, se sugiere implementar un balance hidroclimático para la programación del riego y mejorar la productividad del agua.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización e investigación: M.T.R. y A.E.C. Metodología: M.T.R., Validación y análisis formal: H.A.S., J.Z.E., C.L.L., K.M.G., Escritura, revisión, edición y visualización: H.A.S., B.Z.G., M.T.R., Supervisión: A.T.F., I.A.E., A.M.S. Adquisición de fondos: M.T.R.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por el financiamiento. Proyecto PAPIIT: IT200122.

A los investigadores Ramón Arteaga Ramírez de la Universidad Autónoma Chapingo y Gustavo Mercado Mancera de la FES-Cuautitlán (UNAM) por la disponibilidad de información meteorológica detallada.

LITERATURA CITADA

- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J. I., González-Estrada, A., Mendoza-Castillo, M. C., Volke-Haller, V. H., & Santiago-Mejía, H. (2016). Optimización económica de N, P, K y densidades de plantación en maíz y frijol intercalados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 993-1004.
- Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zamudio-González, B., Zaragoza-Esparza, J., & López-López, C. (2022). Water and agronomic evaluation of maize hybrids in response to different environments and nitrogen doses. *Agrociencia*, 56(1), 1-15. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i1.2698>
- Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zaragoza-Esparza, J., & López-López, C. (2020). Productividad del agua y rendimiento de maíz bajo diferente disponibilidad de humedad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 1005-1016. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2118>

- Blanco-Valdés, Y., & González-Viera, D. (2021). Influencia de la densidad de población en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Cultivos Tropicales*, 42(3), 1-13.
- Canales-Islas, E. I., Tadeo-Robledo, M., Mejía-Contreras, J. A., García-Zavala, J. J., & Espinosa-Calderón, A. (2017). Semilla fértil y androestéril de maíz bajo diferentes densidades de población. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 12(4), 465-473.
- Chura, J., Mendoza-Cortez, J. W., & De la Cruz, J. C. (2019). Dosis y fraccionamiento de nitrógeno en dos densidades de siembra del maíz amarillo duro. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 241-248.
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Irrigation and Drainage, Paper N° 33: Yield response to water* (193 pp.). Rome, Italy: FAO. ISBN: 92-5100744-6
- Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., & Tapia-Naranjo, A. (2000). Variedades no convencionales como opción para elevar la productividad de maíces locales en valles altos de México. *Agronomía Mesoamericana*, 11(1), 159-161.
- Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Zamudio-González, B., Virgen-Vargas, J., Turrent-Fernández, A., Rojas-Martínez, I., ... Martínez-Núñez, B. (2018). H-47 AE, híbrido de maíz para Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 1(41), 87-89.
- Flores-Román, D., Aguilera-Herrera, N., & Flores-Delgadillo, L. (1981). Estudio edafológico de los municipios de Cuautitlán, Estado de México. *Revista del Instituto de Geología UNAM*, 5(1), 80-93.
- Gómez-Montiel, N. O., Cantú-Almaguer, M. A., Sierra-Macias, M., Hernández-Galeno, C. A., Espinosa-Calderón, A., & González-Camarillo, M. (2013). Maíz híbrido H-565, nueva versión del H-507 para el trópico bajo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(5), 819-824.
- González-Robaina, F., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., & Cid-Lazo, G. (2014). Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(4), 21-27.
- Guevara-Escobar, A., Barcenás-Huante, G., Salazar-Martínez, F. R., González-Sosa, E., & Suzán-Azpiri, H. (2005). Alta densidad de siembra en la producción de maíz con irrigación por goteo subsuperficial. *Agrociencia*, 39(4), 431-439.
- Kibet-Serrem, C., López-Castañeda, C., & Kohashi-Shibata, J. (2009). Efecto del nivel de humedad y nitrógeno en el suelo en el comportamiento de maíces híbridos y criollos de los Valles Altos de México. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 103-120.
- López-Hernández, M., Arteaga-Ramírez, R., Ruíz-García, A., Vázquez-Peña, M. A., & López-Rosano, J. I. (2019). Productividad del agua normalizada para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en Chapingo, México. *Agrociencia*, 53(6), 811-820.
- López-López, C., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., García-Zavala, J., Benítez-Riquelme, I., Vázquez-Carrillo, M. G., & Carrillo-Salazar, J. A. (2017). Productividad de cruza simples de maíz con calidad de proteína en Valles Altos de México, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3), 559-570.
- Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Cardoso-Galvao, J. C., Vázquez-Carrillo, G., & Turrent-Fernández, A. (2018). Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1447-1458. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>
- Navarro, B. S., & Navarro, G. G. (2013). *Química Agrícola* (479 pp.). Madrid, España: Mundi-Prensa. ISBN: 9788484766568
- Quevedo, Y. M., Beltrán, J. I., & Barragán-Quijano, E. (2018). Efecto de la densidad de siembra en el rendimiento y rentabilidad de un híbrido de maíz en condiciones tropicales. *Agronomía Colombiana*, 36(3), 248-256. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n3.71268>
- SAS Institute (2002). *Statistical Analysis System. User's Guide. Release 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- SIAP (Servicio de Información Alimentaria y Pesquera). (2022). *Atlas SIAP 2022*. Consultado el 10 de marzo, 2022, desde <http://www.siap.gob.mx/>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, D. E. (2012). *Respuesta del Rendimiento de los Cultivos al Agua Vol.66* (510 pp.) Roma, Italia: FAO. ISBN 978-92-5-308564-4
- Su, W., Ahmad, S., Ahmad, I., & Han, Q. (2020). Nitrogen fertilization effects maize grain yield through regulating nitrogen uptake, radiation and water use efficiency, photosynthesis and root distribution. *PeerJ*, 8(1), 1-21.
- Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Turrent-Fernández, A., Zamudio-González, B., Valdivia-Bernal, R., & Andrés-Meza, P. (2014). Productividad de grano de cuatro híbridos trilineales de maíz en versión androestéril y fértil. *Agronomía Mesoamericana*, 25(1), 45-52.
- Velázquez-Cardelas, G. A., González-Huerta, A., Pérez-López, D. J., & Castillo-González, F. (2018). Análisis de híbridos comerciales y mestizos de maíz formados con germoplasma del INIFAP y del CIMMYT. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 615-627. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1220>
- Virgen-Vargas, J., Zepeda-Bautista, R., Ávila-Perches, M. A., Espinosa-Calderón, A., Arellano-Vázquez, J. L., & Gámez-Vázquez, A. J. (2014). Producción de semillas de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 323-335.
- Zamudio-González, B., Félix-Reyes, A., Martínez-Gutiérrez, A., Cardoso-Galvão, J. A., Espinosa-Calderón, A., & Tadeo-Robledo, M. (2018). Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1231-1244. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.407>
- Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Martínez-Rodríguez, N., & Turrent-Fernández, A. (2016). Índice de cosecha con macro-nutrientes en grano de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1077-1089.