

Utilidad del Agua en Híbridos de Cruza Simple de Maíz con Desespigue y Eliminación de Hojas Water Utility in Single-Cross Corn Hybrids with Detasseling and Leaf Removal

Homero Alonso-Sánchez¹ , Alejandro Espinosa-Calderón² ,
Consuelo López-López¹ , Joob Zaragoza-Esparza¹ ,
Benjamín Zamudio-González² y Margarita Tadeo-Robledo^{1*}

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; (H.A.S.), (C.L.L.), (J.Z.E.), (M.T.R.).

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México. Carretera Los Reyes-Textcoco km 13.5, Coatlinchán. 56250 Texcoco, Estado de México, México; (A.E.C.), (B.Z.G.).

* Autora para correspondencia: tadeorobledo@yahoo.com.mx

RESUMEN

En la producción de semillas es necesario determinar la respuesta de cruza simples progenitoras de híbridos trilineales con la menor cantidad de agua. El objetivo de la investigación fue determinar la utilidad del agua y las variables agronómicas de tres híbridos de cruza simple de maíz (IA442 F × IA446, IA424 F × IA249 y IA442 F × IA213), que se emplean como progenitores de híbridos trilineales, bajo tratamientos de eliminación de espiga y hojas. Los experimentos se ubicaron en dos localidades del Valle de México, en Cuautitlán y Texcoco, Estado de México, en el año 2019. En los dos ambientes, los tres híbridos se manejaron sin desespigue (testigo), desespigue (D) y desespigue con eliminación de una hasta cinco hojas (D+1, D+2, D+3, D+4, D +5); el experimento fue factorial, con diseño experimental en tres bloques completos al azar. La utilidad del agua total y el rendimiento tuvieron diferencia estadística en los ambientes ($p < 0.05$): 2.2 kg m⁻³ y 9.98 Mg ha⁻¹ en Cuautitlán, así como 0.9 kg m⁻³ y 6.39 Mg ha⁻¹ en Texcoco. También se encontró significancia en estas variables entre cruza con 1.5 kg m⁻³ y 7.8 Mg ha⁻¹ para IA442 F × IA446, 1.3 kg m⁻³ y 6.87 Mg ha⁻¹ para IA424 F × IA249 y 1.9 kg m⁻³ con 9.99 Mg ha⁻¹ para IA442 F × IA213. Los tratamientos de desespigue y eliminación de hoja sólo generaron efecto significativo en longitud de mazorca, pero la eliminación de espiga mostró la utilidad y rendimiento más alto (1.7 kg m⁻³ y 9.05 Mg ha⁻¹). El genotipo IA442 F × IA213 presentó la utilidad del agua superior con 2.7 kg m⁻³ en condiciones de menor disponibilidad de agua (Cuautitlán). El desespigue y eliminación de hoja no presentaron efecto en la utilidad del agua total.

Palabras clave: defoliación, eliminación de espiga, uso del agua total, *Zea mays* L.

SUMMARY

In seed production, it is necessary to determine the response of single crosses that serve as parents of three-way hybrids under conditions of limited water availability. The objective of this research was to determine water use efficiency and agronomic variables of three single-cross maize hybrids (IA442 F × IA446, IA424 F × IA249, IA442 F × IA213), parents of three-way hybrids, under tassel and leaf elimination treatments. The experiments were conducted in two locations in the Valley of Mexico, Cuautitlán and Texcoco, State of Mexico. The three hybrids were evaluated under the following treatments: without detasseling (control), detasseling (D), and detasseling with removal of one to five leaves (D+1, D+2, D+3, D+4, D+5). A factorial experiment



Cita recomendada:

Alonso-Sánchez, H., Espinosa-Calderón, A., López-López, C., Zaragoza-Esparza, J., Zamudio-González, B., & Tadeo-Robledo, M. (2025). Utilidad del Agua en Híbridos de Cruza Simple de Maíz con Desespigue y Eliminación de Hojas. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-11. e2266. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2266>

Recibido: 27 de marzo de 2025.

Aceptado: 2 de julio de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Noviembre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Tomás Rivas García

Editor Técnico:

Dr. Fernando López Valdez



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

was established using a randomized complete block design with three replications. Total water use efficiency and grain yield showed significant differences between environments ($p < 0.05$): 2.2 kg m^{-3} and 9.98 Mg ha^{-1} in Cuautitlán, and 0.9 kg m^{-3} and 6.39 Mg ha^{-1} in Texcoco. Significant differences were also observed among crosses, with values of 1.5 kg m^{-3} and 7.8 Mg ha^{-1} for IA442 F $\times$ IA446; 1.3 kg m^{-3} and 6.87 Mg ha^{-1} for IA424 F $\times$ IA249; and 1.9 kg m^{-3} and 9.99 Mg ha^{-1} for IA442 F $\times$ IA213. The detasseling and leaf-removal treatments produced a significant effect only on ear length; however, tassel removal alone resulted in higher water use efficiency and grain yield (1.7 kg m^{-3} and 9.05 Mg ha^{-1}). The IA442 F $\times$ IA213 genotype showed the highest water use efficiency, reaching 2.7 kg m^{-3} under limited water conditions (Cuautitlán). No effect of detasseling or leaf removal on total water use efficiency was observed.

Index words: defoliation, detasseling, total water use, *Zea mays* L.

INTRODUCCIÓN

En México, el rendimiento de maíz por unidad de agua utilizada es de 0.53 kg m^{-3} (Palacios y Excebio, 2020; CONAGUA, 2025), pero puede incrementarse utilizando nuevos híbridos (Virgen-Vargas *et al.*, 2016). A diferencia de la eficiencia en el uso del agua, que relaciona el rendimiento y la evapotranspiración como lámina neta consumida (Su, Ahmad, Ahmad y Han, 2020; Allakonon, Sakari, Tovihoudji, Fatondji y Akponikpe, 2022), la utilidad del agua total es la producción de grano, relacionada con el agua total consumida y considera las pérdidas de agua durante su manejo. El maíz, como planta C4 de origen tropical, tiene requerimiento hídrico superior al de las plantas C3, lo que implica utilidades bajas de agua (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

En México no se tiene información para calcular la utilidad del agua y este indicador es fundamental para la toma de decisiones en la administración del agua. La Comisión Nacional del Agua (CNA) reportó por última vez la lámina media bruta para maíz a nivel nacional entre los años 1990 y 2003, misma que fue de 112 cm, mientras que la lámina neta fue de 67 cm (CONAGUA, 2005). En este mismo periodo el SIAP (2025) reportó el rendimiento promedio nacional de este cultivo bajo riego con 4.9 Mg ha^{-1} , lo que permite inferir que, a nivel nacional, la utilidad promedio de riego en ese periodo fue de 0.41 kg m^{-3} . Además, en los Valles Altos con rendimiento de 4.12 Mg ha^{-1} , la utilidad fue de 0.34 kg m^{-3} y en el Estado de México, con un rendimiento de 4.1 Mg ha^{-1} , la utilidad fue 0.35 kg m^{-3} . La utilidad fue baja, incluso comparada con lo que reportaron Doorenbos, Plusje, Kassam, Branscheid y Bentvelsen (1986) como un promedio mundial de 1.2 kg m^{-3} . Por su parte, Pedroza-Sandoval *et al.* (2014) concluyeron que el maíz fue más eficiente que la alfalfa, puesto que 1 m^3 de agua subterránea produjo 5.72 kg de biomasa, $\$0.67$ de ganancia por m^3 de agua usada y $100\,000 \text{ m}^3$ de agua produjeron 0.65 empleos durante el ciclo del cultivo; mientras que, la alfalfa produjo 0.215 kg de biomasa, $\$0.90$ de ganancia y se generaron 0.43 empleos con los mismos volúmenes de agua indicados en el maíz.

En el trabajo de López, Cid, González, Herrera y Chaterlán (2011) reportaron la lámina óptima de 450 mm para maximizar la utilidad del agua en maíz, lo que generó una productividad de 1.2 kg m^{-3} . Este indicador sobre eficiencia se ve afectado por el genotipo y el fenotipo como lo reportaron Alonso-Sánchez, Tadeo, Espinosa, Zaragoza y López (2020), por lo que se deben investigar sus valores para los materiales disponibles por región; además, se debe incluir el efecto de técnicas de manejo del cultivo como el control de la humedad en el suelo (Afandi, Khalis y Ouda, 2010), o bien como ocurre en producción de semillas, donde se someten las cruza simples progenitoras de híbridos trilineales a la aplicación de desespigue y eliminación de hojas, para obtener semilla híbrida de maíz, además de evaluar este manejo en ambientes diferentes.

En los Valles Altos de México se han realizado investigaciones para desarrollar nuevos híbridos de maíz, como ocurre en la UNAM, con los híbridos Tlaoli Puma y Atziri Puma. En las cruza simples progenitoras de estos materiales, se requiere conocer el efecto en el rendimiento de semilla y su relación con el consumo de agua por la eliminación de la espiga (panícula) y las hojas superiores. Las investigaciones de Espinosa-Calderón *et al.* (2010a) y Espinosa-Calderón *et al.* (2010b) encontraron efecto en el rendimiento al eliminar la espiga en híbridos de maíz que se comercializan en Valles Altos, pero Virgen-Vargas *et al.* (2016) no encontraron efecto del desespigamiento en cruza simples de líneas que generó el CIMMYT y el INIFAP; además, en el trabajo de Tadeo-Robledo *et al.* (2013) no se encontró efecto en el rendimiento al aplicar los tratamientos de eliminación de espiga y hojas en progenitores androestériles y fértiles de los híbridos H-47 y H-49 que se comercializan en Valles Altos; así también, Quiroga-Cardona (2019) no encontró efecto en el rendimiento al despanojar y eliminar hojas de líneas parentales de maíz. En cambio, Espinosa-Calderón *et al.* (2010b) encontraron efecto negativo de la eliminación de hojas en el rendimiento de grano de cruza simples de maíz en Cuautitlán, Estado de México y se relacionó con el efecto de la disminución de área fotosintética.

En producción de semilla de maíz se requiere conocer el efecto del desespigue sobre la utilidad del agua, porque este indicador permite tomar decisiones informadas en la administración del agua para optimizar su uso en el riego agrícola, sobre todo cuando en los últimos años la CONAGUA (2025) reportó incremento de la escasez y presión sobre la demanda del recurso. Además, en los trabajos recientes de desespigue del maíz no hay reportes sobre su relación con la utilidad del agua. En este contexto, las investigaciones sobre la producción de alimentos por consumo unitario de agua son esenciales para identificar su productividad marginal y a través de funciones matemáticas, permita determinar la máxima producción optimizando recursos (López-Hernández, Arteaga, Ruíz, Vázquez y López, 2019; Palacios y Excebio, 2020).

Es importante determinar la utilidad del agua en los híbridos de cruza simple bajo manejo de desespigue para identificar las respuestas en productividad en escenarios de restricción de recursos hídricos que ocurren con frecuencia en México, en este contexto, el trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del desespigue y eliminación de hojas en la utilidad del agua y variables agronómicas de híbridos de cruza simple de maíz, por medio del rendimiento de semilla relacionado con la cantidad total de agua, precipitación más riego, que ingresó en dos ambientes del Valle de México. La hipótesis consistió en que, si se elimina la espiga y algunas hojas superiores de la planta de maíz, entonces se incrementa la utilidad del agua por una respuesta positiva en el rendimiento de semilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ambientes

Dos experimentos se establecieron el 23 de junio de 2019 en el Estado de México; uno en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM (FESC-UNAM), que se encuentra en el área de influencia del Distrito de Riego 073 La Concepción, en el municipio de Cuautitlán Izcalli a 2253 m de altitud con 19° 41' 48" N y 99° 11' 36" O donde las normales de precipitación anual y temperatura media son 647 mm y 15.4 °C. El otro experimento se estableció en el Ejido de Huexotla, en el municipio de Texcoco a la altitud de 2243 m de altitud con 19° 29' 33" N y 98° 54' 24" O los valores normales de la estación más cercana (15170 Chapingo), que presentó precipitación de 618 mm y temperatura media de 16.4 °C. En Cuautitlán ingresaron 450 mm por precipitación durante el ciclo del maíz y la evapotranspiración del cultivo fue de 566 mm, estimada a partir de la fórmula de Penman Monteith; en Texcoco se aplicaron mediante riego convencional 335 mm de lámina bruta, uno para germinación y tres de auxilio cuando se observó marchitamiento en las plantas (38, 78 y 127 días después de la siembra), además, ingresaron 346 mm por precipitación para sumar en total 681 mm; la evapotranspiración del cultivo en este sitio fue de 611 milímetros.

Características Edáficas

La caracterización físico-química del suelo de Cuautitlán y Texcoco fueron de forma respectiva como: conductividad hidráulica de 3.5 y 1.6 cm h⁻¹, materia orgánica 1.95 y 0.8%, textura franco-arcillosa y migajón arcillo limosa, densidad aparente de 1.02 y 1.2 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 12.2 me 100 g⁻¹ SS, CE de 0.55 y 0.14 dS m⁻¹. En el ambiente de Cuautitlán el suelo presentó capacidad alta de almacenamiento de agua, pero con movimiento vertical alto cuando está saturado, la capacidad de almacenamiento de nutrientes es alta y bajo en carbonatos y sales, contenido medio de materia orgánica y pedregosidad menor al 1%. En el ambiente de Texcoco el suelo presentó baja capacidad de aireación debido al movimiento vertical bajo a saturación, contenido bajo de materia orgánica y presencia heterogénea de pedregosidad con arena a los 30 cm de profundidad. En el sitio Cuautitlán el suelo es phaeozem vértico (Flores-Román, Aguilera y Flores, 1981) y en Texcoco es fluvisol mólico (Govaerts et al., 2008).

Material Genético y Diseño Experimental

En dos ambientes (factor A), uno en Cuautitlán (A1) y el otro en Texcoco (A2), se establecieron tres híbridos de cruza simple (factor G) generadas en la FESC UNAM: IA442 F × IA446 (G1), IA424 F × IA249 (G2), IA442 F × IA213 (G3), bajo siete condiciones de manejo del desespigue (factor D) como: testigo sin desespigue, eliminación de espiga (D) y eliminación de espiga más una hasta cinco hojas (D+1, D+2, D+3, D+4, D+5). Los tratamientos de

desespigue se eligieron porque en producción de semilla las labores manuales o mecánicas eliminan hasta cinco hojas, como una recomendación para facilitar y mejorar la calidad del desespigue, evitando autofecundación (riesgo de contaminación con el polen de plantas hembras) y reduciendo la inversión en jornales. Los tratamientos se conformaron por la combinación de los niveles de los factores, como lo recomendó Montgomery (2020), con $2A \times 3G \times 7D = 42$ tratamientos, que se implementaron en unidades experimentales (UE) homogéneas de longitud 5.0 m y ancho 0.80 m, lo que implicó un tamaño de UE de 4 m². El diseño experimental fue factorial en tres bloques completos al azar.

Labores Culturales

La preparación del terreno consistió en labranza primaria del suelo con el arado de discos, trituración de terrones con dos pasos de rastra en forma de cruz, distribución de fertilizante con boleadora y la conformación de los surcos en la dirección sur a norte con el arado. La siembra se realizó de forma manual con el suelo al 10% de humedad volumétrica, donde se distribuyeron 50 semillas a lo largo de la UE; la densidad final (70 mil plantas ha⁻¹) se definió en la etapa V3 mediante aclareo con una distancia entre plantas que en promedio fue de 0.17 metros.

La fertilización, como dosis única, se aplicó a la siembra con una mezcla física de las fuentes fosfato diamónico (18-46-00) y urea (46-00-00) para la dosis 80-40-00. El manejo de malezas se realizó utilizando control químico con Picloram 2,4 D-amina (2 L ha⁻¹), Atrazina (2 kg ha⁻¹) y Nicosulfurón (1.5 L ha⁻¹) con aplicación a la siembra y 30 días después de la siembra (DDS). No se presentaron plagas ni enfermedades con afectación severa. El riego solamente se aplicó en el ambiente de Texcoco para la germinación y por manejo convencional el productor aplicó tres riegos de auxilio cuando las plantas comenzaron a mostrar estrés hídrico a los 38, 78 y 127 DDS. En Cuautitlán no se aplicó riego porque con el balance hidroclimático se identificó que la humedad aprovechable no disminuyó más del 70 por ciento.

Variables Respuesta

En la parcela se midió la floración femenina (FF), que se identificó a partir de la fecha de siembra, la altura de mazorca (AM) medida desde la superficie del suelo hasta el nudo de inserción en el tallo de la mazorca primaria. La cosecha se realizó en la segunda semana de diciembre en ambas localidades. En cada UE se recolectaron de forma manual todas las mazorcas para obtener el peso de campo (PC) y una muestra de cinco mazorcas se seleccionó para identificar las componentes del rendimiento.

Las determinaciones en laboratorio consistieron en la caracterización de la mazorca con variables como: la longitud de mazorca (LM), medida con un vernier, las hileras por mazorca (HM) y el número de semillas por hilera (SH) que se determinaron por conteo y el número de semillas de la mazorca (SM) por cálculo como $HM \times SH$. El porcentaje de semilla (%S) se calculó a partir del peso de semilla con respecto al peso de la muestra de mazorcas con su raquis. El peso volumétrico (PV) y el porcentaje de humedad de la semilla se identificaron a partir de una muestra procesada en el aparato Stent Lite DICKEY-Jhon modelo GAC 2100. La materia seca (MS) de la semilla se calculó restando el contenido de humedad al peso de la semilla húmeda.

El rendimiento de semilla (RS) se determinó a partir de la expresión $RS = (PC \times MS \times S \times FC) / 0.8771$ donde, RS es el rendimiento de semilla en Mg ha⁻¹, PC es el peso completo de todas las mazorcas de la UE en Mg, MS es la fracción de materia seca, S es la fracción de semilla respecto al peso completo de mazorca, FC es el factor para convertir el rendimiento de la UE a una hectárea y 0.8771 es un factor para convertir el rendimiento en peso seco de semilla a un contenido de 14% que corresponde al contenido medio de humedad en la comercialización de la semilla del maíz.

La producción de los híbridos por unidad de agua utilizada durante su ciclo se determinó por medio de la utilidad del agua total $UAT = RS / VT$, donde; UAT, utilidad del agua total en kg m⁻³, RS, rendimiento de semilla en kg ha⁻¹, y VT, volumen total por precipitación más riego en metros cúbicos por hectárea.

En la FESC-UNAM, al no aplicar riego, el VT se cuantificó sólo con el volumen acumulado por precipitación durante el ciclo del cultivo, en este sitio se utilizaron los registros de precipitación pluvial de la estación meteorológica FES-Cuautitlán (15 043). En Texcoco, el VT se cuantificó con el volumen por precipitación acumulado a partir de registros en la estación meteorológica Chapingo (15 170), más el volumen de riego que se identificó ponderando el caudal aforado por el tiempo de riego.

La verificación de los supuestos y el análisis de varianza (ANVA) se realizaron en el programa de computadora SAS 9.1 (SAS Institute, 2002) y la comparación de las medias fue con el método de Tukey ($p = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del ANVA mostraron efecto estadístico ($p < 0.05$) de los factores sobre las variables respuesta: los ambientes produjeron diferencias estadísticamente significativas a excepción de la floración femenina y el número de semillas por hilera, los genotipos presentaron respuesta altamente significativa a excepción del número de hileras por mazorca y el peso volumétrico, el factor desespigue y eliminación de hoja sólo mostró efecto significativo sobre la longitud de mazorca y semillas por hilera. La interacción ambiente por genotipo ($A \times G$) mostró efecto altamente significativo y se presentó para UAT, FF, LM, SH Y SM, la interacción ambiente $\times$ desespigue ($A \times D$) generó efecto altamente significativo para FF y SH y efecto significativo para LM y SM. Las otras interacciones no presentaron efecto estadístico (Cuadro 1).

La utilidad del agua total resultó estadísticamente significativa en los ambientes, genotipo y en la interacción ambiente por genotipo, mientras que, el rendimiento de semilla mostró diferencias estadísticas, al mismo nivel de probabilidad, para los factores ambiente y genotipo. Las medias de estas variables fueron de 1.57 kg m^{-3} y 8.1 Mg ha^{-1} , además, el coeficiente de variación fue de 20.0 y 19.54% respectivamente.

La floración femenina fue en promedio a los 78 días lo cual indicó que estas cruza simples son precoces, pues la floración ocurrió antes de los 80 días (López-López et al., 2017). Las cruza simples de este trabajo se emplean para generar semilla de los híbridos trilineales Tlaoli PUMA y Atziri PUMA con esta característica. La altura de mazorca de 98 cm fue menor a la reportada para genotipos de Valles Altos (Espinosa-Calderon et al., 2018; López-López et al., 2017) lo que indicó una característica deseable para las actividades de producción de semilla híbrida, donde se requiere desespigar o bien cuando es necesario polinizar (Tadeo-Robledo et al., 2014), pues las alturas menores eficientizan el trabajo de los jornales cuando se requiere eliminar la espiga (Virgen-Vargas et al., 2016). Adicionalmente, esta característica favorece la obtención de materiales con reducción de acame y se facilitan los trabajos cuando la cosecha es mecanizada, lo que ocurriría en el caso de los híbridos trilineales en producción comercial de grano.

La caracterización de la mazorca mostró valores inferiores a los que reportaron Martínez-Gutiérrez et al. (2018) para materiales híbridos trilineales y López-López et al. (2017) para cruza simples de maíz en el Valle de México; en este trabajo las variables resultaron con 12.9 cm de longitud, 16 hileras y 26 semillas para 414 semillas en total, con un peso volumétrico de 73.6 kg hL^{-1} ; los resultados se relacionan con el efecto que presentó el ambiente en las características de la mazorca (Alonso-Sánchez et al., 2025).

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia de nueve variables respuesta en el desespigamiento y eliminación de hojas de tres híbridos de cruza simple de maíz en dos ambientes de Valles Altos. Ciclo verano otoño, 2019.

Table 1. Mean squares and significance of nine response variables in the detasseling and leaf removal of three single-cross maize hybrids in two environments of the High Valleys. Summer-autumn cycle, 2019.

Fuente de variación	Variables								
	UAT	RS	PV	FF	ALM	LM	HM	SH	SM
	kg m^{-3}	Mg ha^{-1}	kg hL^{-1}	Días	cm			núm.	
Ambiente (A)	51.55**	405.7**	421.3**	0.5	314.2**	90.1**	27.1**	20.48	47483.4**
Genotipo (G)	3.75**	99.6**	20.72	31.1**	634.9**	13.2**	3.47	130.5**	50701.7**
Desespigue (D)	0.11	3.91	13.68	4.47	26.42	4.17*	0.78	19.54*	2136.5
$A \times G$	0.71**	6.46	25.18	37.7**	119.57	7.4**	1.73	53.1**	23155.3**
$A \times D$	0.15	5.15	13.28	13.3**	38.86	3.47*	1.83	16.84**	7994.4*
$G \times D$	0.11	2.65	16.16	5.85	26.37	1.97	0.43	8.99	3239.1
$A \times G \times D$	0.17	4.5	21.11	3.47	82.32	1.77	1.02	7.01	3016.4
CV	20.1	19.54	5.23	2.63	6.73	9.53	7.38	10.89	14.52
Media	1.57	8.18	73.61	77.9	98.4	12.9	16	26.5	413.7

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; CV = coeficiente de variación (%); UAT = utilidad del agua total; RS = rendimiento de semilla; PV = peso volumétrico; FF = floración femenina; ALM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; HM = hileras por mazorca; SH = semillas por hilera; SM = semillas por mazorca.

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; CV = variation coefficient (%); UAT = total water utility; RS = seed yield; PV = volumetric weight; FF = female flowering; ALM = cob height; LM = cob length; HM = cob rows; SH = row seeds; SM = cob seeds.

Comparación de Medias

La utilidad del agua entre ambientes mostró diferencia significativa y el valor mayor se presentó en Cuautitlán con 2.2 kg m^{-3} y en Texcoco fue de 0.9 kg m^{-3} ; la diferencia de 1.3 unidades en la utilidad representa un eficiente aprovechamiento del agua en Cuautitlán, pues se presentó mayor producción de semilla por consumo unitario de agua y estuvo relacionado con las características favorables del suelo en este ambiente.

El rendimiento promedio de semilla de 9.98 (Cuautitlán) y 6.39 Mg ha^{-1} (Texcoco) tuvo una diferencia de 4.59 toneladas que representa una producción 56% mayor en Cuautitlán. La diferencia se relaciona con el efecto de las condiciones edáficas y climáticas de los ambientes, de modo que; en Cuautitlán el suelo propició almacenamiento de agua mayor y su disponibilidad para la planta en periodos donde hay un receso en la precipitación, aun cuando la evapotranspiración excedió en 116 mm el aporte total de agua; en cambio, en el sitio de Texcoco el suelo presentó baja capacidad de almacenamiento, lo que provocó déficit de agua, aun cuando el aporte superó en 70 mm a la evapotranspiración. La diferencia en rendimiento entre los ambientes que se presentó en este trabajo también se ha observado en otros estudios (Alonso-Sánchez *et al.* 2025; López-López *et al.*, 2017), por lo que, los riegos de auxilio en el ambiente de Texcoco deben considerar un balance hidroclimático, que involucre la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, para evitar la percolación y lixiviación de nutrientes como consecuencia del manejo deficiente del riego.

Debido al efecto de ambiente, el peso volumétrico, altura y longitud de mazorca, hileras y número de semillas por mazorca resultaron con diferencia significativa y fueron superiores en Cuautitlán (Cuadro 2); los resultados de estas variables se relacionan con el rendimiento mayor en Cuautitlán ya que López-López *et al.* (2017) reportaron correlación positiva de estas variables con el rendimiento de híbridos de cruz simple en ambientes del Valle de México.

Cuadro 2. Comparación de medias entre ambientes, genotipos de maíz y desespigue con eliminación de hoja para la utilidad del agua y otras variables de importancia agronómica.

Table 2. Means comparison between environments, maize genotypes and detasseling with leaf removal for water utilization and other variables of agronomic importance.

Niveles de los factores	Variables								
	UAT	RS	PV	FF	ALM	LM	HM	SH	SM
	kg m^{-3}	Mg ha^{-1}	kg hL^{-1}	días	- - - - -	cm - - - - -	- - - - -	núm. - - - -	- - - -
Ambiente									
Cuautitlán	2.2 a	9.98 a	75.4 a	78 a	100 a	13.8 a	16 a	27 a	433 a
Texcoco	0.9 b	6.39 b	71.8 b	78 a	97 b	12.1 b	15 b	26 a	394 b
DSH	0.1	0.56	1.4	0.7	2.3	0.4	0.4	1.0	21
Genotipo									
IA442 F × IA446	1.5 b	7.80 b	72.91 a	79 a	100 a	12.7 b	15 a	26 b	394 b
IA424 F × IA249	1.3 c	6.87 c	73.61 a	77 b	94 b	12.6 b	15 a	25 b	399 b
IA442 F × IA213	1.9 a	9.88 a	74.31 a	78 b	101 a	13.6 a	16 a	28 a	453 a
DSH	0.2	0.83	2	1.1	3.4	0.6	0.6	1.5	31
Desespigue									
Test sin Desespigue	1.6 a	8.60 a	73.77 a	78 a	99 a	12.9 ab	15 a	27 a	413 a
Eliminación Espiga	1.7 a	9.05 a	75.16 a	78 a	98 a	13.4 b	15 a	27 a	424 a
Espiga + 1 hoja	1.5 a	8.13 a	74.11 a	78 a	98 a	13.3 a	15 a	27 a	420 a
Espiga + 2 hoja	1.5 a	7.93 a	73.43 a	77 a	97 a	13.3 a	15 a	27 a	423 a
Espiga + 3 hoja	1.5 a	7.89 a	73.22 a	78 a	97 a	12.9 ab	16 a	26 a	411 a
Espiga + 4 hoja	1.5 a	7.90 a	72.37 a	77 a	99 a	12.7 ab	16 a	26 a	411 a
Espiga + 5 hojas	1.5 a	7.79 a	73.21 a	78 a	100 a	11.9 b	16 a	25 a	393 a
DSH	0.3	1.61	3.87	2.1	6.7	1.2	1.1	2.9	60

UAT= utilidad del agua total; RS = rendimiento de semilla; PV = peso volumétrico; FF = floración femenina; ALM = altura de mazorca; LM = longitud de mazorca; HM = hileras por mazorca; SH = semillas por hilera; SM = semillas por mazorca, DSH = diferencia significativa honesta. Las medias con la misma letra dentro de las columnas de las variables observadas para cada factor (ambiente, genotipo y desespigue) son iguales estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

UAT = total water utility; RS = seed yield; PV = volumetric density; FF = female flowering; ALM = cob height; LM = cob length; HM = cob rows; SH = row seeds; SM = cob seeds; DSH = honest significant difference. Means with the same letter within the columns of observed variables for each factor (environment, genotype, and detasseling) are statistically equal (Tukey, $p < 0.05$).

El peso volumétrico en Cuautitlán fue superior en 4.66 unidades como una respuesta a la menor cantidad de agua total, que generó semillas más densas, este comportamiento también lo reportaron Virgen-Vargas *et al.* (2016) en un estudio de líneas progenitoras en Texcoco como respuesta de la semilla cuando la planta se somete a condiciones de restricción de humedad.

El promedio de la floración femenina fue igual en los dos ambientes (78 días) porque pertenecen a lo que fue la zona lacustre de la Cuenca de México donde los elementos del clima son similares por la altitud y latitud que influyen en la fenología de las plantas (Azcón Bieto y Talón, 2008; Virgen-Vargas *et al.*, 2016).

En Cuautitlán, la altura de mazorca fue mayor en 3.2 cm, así como la longitud mayor de mazorca (13.79 cm), que propició en promedio más semillas por hilera (26.9 semillas) y 39 semillas más por mazorca con respecto a Texcoco. Estos resultados también explican la producción mayor en este ambiente, como una respuesta de la relación directa de estas variables con el rendimiento de semilla, como lo reportaron López-López *et al.* (2017).

La comparación entre genotipos mostró diferencia significativa y la utilidad mayor del agua la presentó IA442 F × IA213, con 1.9 kg m⁻³ seguido de IA442 F × IA446 con 1.5 kg m⁻³ y el más bajo IA424 F × IA249 con 1.3 kg m⁻³, en ese mismo orden sus rendimientos fueron 9.88, 7.8 y 6.87 Mg ha⁻¹. El incremento en utilidad de IA442 F × IA213, fue del 46% respecto al más bajo ya que la diferencia en producción de semilla fue de 44% y existe una relación directa entre estas variables; bajo este resultado, esta cruza es sobresaliente para emplearla en la obtención de híbridos para Valles Altos donde la disponibilidad de agua es limitada. Lo anterior es importante, ya que se define a esta cruza simple, como alternativa, por sus ventajas, en el uso del agua y las perspectivas para generar híbridos de maíz.

Dentro de los ambientes se presentó el mismo comportamiento de los genotipos en su respuesta a la utilidad del agua, de modo que en Cuautitlán IA442 F × IA213, presentó 2.68 kg m⁻³ y fue superior también en 46% respecto al más bajo IA424 F × IA249, con 1.84 kg m⁻³; así también, en Texcoco IA442 F × IA213, tuvo la utilidad mayor de 1.12 kg m⁻³, que fue superior en 42% respecto al más bajo IA424 F × IA249 el cual presentó 0.79 kg m⁻³. Las diferencias en porcentajes son una medida del posible ahorro de agua, sin detrimento de la producción o incluso aumentándole por unidad de volumen. Mediante estos resultados, se observa la aptitud de los híbridos de cruza simple, al conformar materiales que sintetizan características deseables para su distribución en los ambientes con limitada cantidad de agua. Además, la producción de los híbridos de cruza simple por unidad de agua es un indicador de posible utilidad en la caracterización de ambientes, según su disponibilidad de agua, para la producción de semilla de híbridos. El genotipo IA442 F × IA213 sobresalió, ya que fue el valor superior en peso volumétrico con 74.3 kg hL⁻¹, este valor implicó semillas más densas que mejoraron su rendimiento; también, su floración resultó más precoz que el IA442 F × IA446, pero igual que IA424 F × IA249 y su altura de mazorca fue superior con 7.3 cm con respecto al más bajo IA424 F × IA249.

En el caso del factor desespigue y eliminación de hoja no se observaron diferencias significativas en la utilidad del agua ni en el rendimiento de semilla, pero los valores oscilaron de 1.5 a 1.7 kg m⁻³ y de 7.79 a 9.05 Mg ha⁻¹, respectivamente, lo que sería conveniente y debería confirmarse en trabajos posteriores. El tratamiento con eliminación de la espiga mostró los valores superiores de estas dos variables, lo que se ubica en lo esperado, ya que, al eliminar la espiga, los fotosintatos, que se gastarían en la producción de polen, se dirigen a las estructuras que permanecen en la planta, lo que es importante, seguido del testigo sin desespigue donde se redujo en 11.7% la utilidad del agua y cuando se eliminaron la espiga y las hojas se redujo la utilidad en todos los casos en 23.5%. El mayor rendimiento del desespigue está relacionado con el ahorro energético que representa la eliminación de la espiga y con ello la falta de generación de polen, esta energía se traduce en rendimiento (Espinosa-Calderón *et al.*, 2010a), que explica la utilidad mayor del tratamiento de desespigue. Sin embargo, la eliminación de las hojas resultó en disminución del rendimiento, así como de la utilidad del agua debido a que estos órganos son fábricas de fotosintatos hasta la madurez fisiológica; además, contienen reservas de nutrientes que se translocan al llenado de semillas (Azcón-Bieto y Talón, 2008; Castellanos *et al.*, 2022). La eliminación de las hojas, aunque puede reducir la pérdida de agua por transpiración y reducir el consumo de agua (se requiere evaluar el efecto de la eliminación de hojas en la reducción de la evapotranspiración), no representa una ventaja en la producción de semilla, esta definición es importante, porque permite adoptar el desespigue y eliminación de hojas para asegurar la calidad genética de los híbridos que se incrementan. El hecho de no sufrir reducción significativa del rendimiento cuando se eliminan hasta cinco hojas representa una oportunidad para que en las líneas fértiles se pueda realizar la eliminación de espiga de forma mecánica por debajo del nudo de inserción de la espiga sin afectar el rendimiento, pero favoreciendo el completo desespigue y control de calidad, evitando la contaminación con polen.

Los resultados mostraron que el desespigue y eliminación de hojas no contribuyen al incremento en la producción de semilla de maíz ni a la utilidad del agua, pero sí representan más trabajo de jornales, lo que eleva los precios unitarios de producción; sin embargo, esta actividad es indispensable en la producción de semilla híbrida de maíz. Bajo estos resultados, es más viable el uso de la técnica de la androesterilidad para los procedimientos de mejoramiento genético, para reducir costos como lo evidenciaron también Martínez-Lázaro, Mendoza, García, Mendoza y Martínez (2006) con híbridos isogénicos de maíz en el Colegio de Postgraduados y Tadeo-Robles *et al.* (2014) con híbridos androestériles de maíz en la FESC UNAM, e INIFAP, en el Estado de México.

Los resultados del factor desespigue y eliminación de hoja son acordes a lo que reportaron Tadeo-Robledo *et al.* (2014) quienes no encontraron efecto significativo en la producción de semilla cuando se eliminaron hasta dos hojas en cruza simples que se evaluaron en tres ambientes del Estado de México, pero contravienen lo que reportaron Macchi, Rincón, Ruíz y Castillo (2010) y Espinoza-Calderón *et al.* (2010a) para los tratamientos desespigados, ya que identificaron rendimiento mayor de semilla respecto a la media de los materiales testigo.

En este trabajo la longitud de mazorca también fue mayor en el tratamiento de desespigue 13.37 cm, esta respuesta se ha relacionado con el ahorro energético al no producir polen y canalizar los carbohidratos a los sumideros (Azcón-Bieto y Talón 2008; Castellanos *et al.*, 2022). La longitud menor la presentó el tratamiento de desespigue más cinco hojas con 11.98 cm y es posible que se deba a la reducción en la elaboración de fotosintatos y la pérdida de reservas de las hojas (Virgen-Vargas *et al.*, 2014); en las variables PV, FF, ALM, HM, SH y SM no se observó diferencia significativa.

Interacción

La interacción ambiente con genotipo mostró utilidad del agua mayor en Cuautitlán con el genotipo IA442 F × IA213, (2.7 kg m⁻³), esta interacción también sobresalió para longitud de mazorca (14.8 cm), semillas por hilera (29.9) y semillas por mazorca (493), pero la floración resultó más precoz (77 días) respecto a los otros híbridos de cruza simple (Cuadro 3); las respuestas anteriores probablemente pueden tener explicación en las líneas progenitoras, sus característica productivas respecto a otras líneas, así como el nivel de autofecundaciones que interaccionan con el ambiente más favorable (Virgen-Vargas *et al.* 2014).

En Cuautitlán las condiciones del suelo como su mayor capacidad de almacenamiento de agua propiciaron menor déficit hídrico. En Texcoco, aunque se aplicó riego para complementar el requerimiento, el suelo tiene menor almacenamiento por el drenaje que propician la presencia de piedra y arena por debajo de los 30 cm; lo anterior generó déficit de agua en el suelo que posiblemente ocasionó un incremento de la resistencia al flujo del agua hacia las raíces; además, la aireación deficiente de la textura fina en la capa superficial (30 cm) también reducen la disponibilidad de agua a nivel radicular como lo reportaron Navarro y Navarro (2013).

Cuadro 3. Comparación de medias de la interacción de los factores ambiente por híbridos de cruza simple de maíz de las variables respuesta. Ciclo verano otoño 2019.

Table 1. Comparison interaction means of environmental factors by single-cross maize hybrids of the response variables. Summer-autumn cycle 2019.

Ambiente	Genotipo	UAT	FF	LM	SH	SM
		kg m ⁻³	días	cm	- - - - - núm. - - - - -	
Cuautitlán	IA442 F × IA446	2.1 b	80 a	13.0 bc	25 b	387 b
Cuautitlán	IA424 F × IA249	1.8 b	77 b	13.5 b	26 b	418 b
Cuautitlán	IA442 F × IA213	2.7 a	77 b	14.8 a	30 a	493 a
Texcoco	IA442 F × IA446	0.9 cd	78 b	12.3 cd	26 b	400 b
Texcoco	IA424 F × IA249	0.8 d	77 b	11.6 d	25 b	368 b
Texcoco	IA442 F × IA213	1.1 c	78 ab	12.4 cd	27 b	414 b
DSH		0.3	1.8	1.1	2.5	53

UAT = utilidad del agua total; FF = floración femenina; LM = longitud de mazorca; SH = semillas por hilera; SM = semillas por mazorca, DSH = diferencia significativa honesta. Las medias con la misma letra dentro de las columnas de las variables respuesta son iguales estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

UAT = total water utility; FF = female flowering; LM = cob length; SH = row seeds; SM = cob seeds; DSH = honest significant difference. Means with the same letter within the columns of the response variables are statistically equal (Tukey, $p < 0.05$).

La fertilidad del suelo también fue a favor de Cuautitlán, así como las condiciones climáticas como temperaturas más bajas, que repercutieron en la menor evapotranspiración (566 mm) respecto a Texcoco (611 mm). Las características edáficas y climáticas anteriores explican el desempeño sobresaliente de los genotipos en Cuautitlán respecto al ambiente de Texcoco.

En la interacción del genotipo IA424 F × IA249 con el ambiente Texcoco resultó con los valores más bajos de utilidad del agua (0.8 kg m^{-3}), longitud de mazorca (11.6 cm), semillas por hilera (24.6) y semillas por mazorca (368), además, también presentó los valores menores en el promedio general entre genotipo; estos resultados son la respuesta del efecto del genotipo y el fenotipo.

La interacción ambiente con los tratamientos de desespigue resultó significativa para floración femenina, longitud de mazorca, semillas por hilera y semillas por mazorca (Cuadro 4). En Cuautitlán, la longitud de mazorca y semillas por hilera fueron superiores con D + 2 hojas que resultaron con 14.4 cm y 28 semillas respectivamente, también el número de semillas por mazorca (454) fue superior en ese ambiente, pero con D + 4 hojas, los resultados se relacionan con el ahorro energético que propicia el desespigue (Espinosa-Calderón *et al.*, 2010a; Virgen-Vargas *et al.*, 2016). En Texcoco se presentaron los valores menores cuando se aplicó D + 5 hojas lo que resultó en 10.7 cm de longitud de mazorca, 23 semillas por hilera y 350 semillas por mazorca, el diferencial entre ambientes se explica por sus condiciones edáficas y climáticas particulares. La floración femenina más tardía se presentó en Cuautitlán con 80 días para el testigo sin desespigar como una respuesta a la disponibilidad de agua, en cambio, la menor fue de 77 días para D + 5 hojas en el mismo ambiente; posiblemente se explica como una respuesta fisiológica de la planta al desespigue y eliminación de hojas que adelantan la floración femenina.

En otros trabajos como el de Espinosa-Calderón *et al.* (2010a) y el de Tadeo-Robledo *et al.* (2014) también se han reportado las interacciones del ambiente con los tratamientos de desespigue y eliminación de hojas en variables como la longitud de mazorca y semillas por hilera; en contraste a los resultados de este trabajo, en aquellos también se reportaron efectos de esta interacción sobre el rendimiento de semilla.

Cuadro 4. Comparación de medias de la interacción de los factores ambiente con desespigue y eliminación de hojas en genotipos de maíz. Verano otoño 2019.

Table 4. Comparison of interaction means of environmental factors with detasseling and leaf removal in maize genotypes. Summer-autumn 2019.

Ambiente	Genotipo	Variable			
		FF	LM	SH	SM
		días	cm	- - - - - núm.	- - - - -
Cuautitlán	Testigo sin D	80 a	13.1 abc	26 ab	406 ab
Cuautitlán	Desespigue	79 a	13.7 ab	27 ab	428 ab
Cuautitlán	D + 1 hoja	79 a	14.0 ab	27 ab	419 ab
Cuautitlán	D + 2 hoja	77 a	14.4 a	28 a	443 ab
Cuautitlán	D + 3 hoja	78 a	14.2 a	27 ab	445 ab
Cuautitlán	D + 4 hoja	76 a	13.7 ab	27 ab	454 a
Cuautitlán	D + 5 hojas	77 a	13.2 abc	26 ab	434 ab
Texcoco	Testigo sin D	77 a	12.8 abc	27 ab	420 ab
Texcoco	Desespigue	78 a	12.9 abc	28 a	420 ab
Texcoco	D + 1 hoja	77 a	12.5 abcd	28 a	421 ab
Texcoco	D + 2 hoja	78 a	12.1 bcd	26 ab	403 ab
Texcoco	D + 3 hoja	78 a	11.6 cd	25 ab	376 ab
Texcoco	D + 4 hoja	78 a	11.7 cd	25 ab	367 ab
Texcoco	D + 5 hojas	78a	10.7 d	23 b	350 b
DSH		3	1.9	4.6	97

FF = floración femenina; LM = longitud de mazorca; SH = semillas por hilera; SM = semillas por mazorca, DSH = diferencia significativa honesta. Las medias con la misma letra dentro de las columnas de las variables respuesta son iguales estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

FF = female flowering; LM = cob length; SH = rows seeds; SM = cob seeds; DSH = honest significant difference. Means with the same letter within the columns of the response variables are statistically equal (Tukey, $p < 0.05$).

Los resultados de esta investigación podrían ser de utilidad para los mejoradores genéticos, quienes emplean la utilidad del agua para identificar genotipos con tolerancia en áreas donde los recursos hídricos son limitados; al identificar genotipos que sobresalen en utilidad del agua y producción, el trabajo contribuye indirectamente a la seguridad hídrica para incidir en la problemática sobre la crisis del agua que plantean López-Hernández *et al.* (2019) y Palacios y Excebio (2020) en sinergia con la seguridad alimentaria que se aborda a partir de la producción de semillas y mejoramiento genético (Espinosa-Calderon *et al.*, 2018; Turrent-Fernández, Espinosa, Cortés y Mejía, 2018; Velázquez-Cardelas, González, Pérez y Castillo, 2018).

CONCLUSIONES

La eliminación de espiga incrementó el rendimiento, con respecto al desespigue y eliminación de cinco hojas, en términos económicos y de ahorro de agua, este comportamiento del desespigue podría representar una ventaja competitiva respecto a la eliminación de hojas, por lo que se deben realizar estudios futuros para verificarlo. Se espera que, en investigaciones posteriores, se determine la evapotranspiración por desespigue y eliminación de hojas, lo que mejoraría la comprensión del uso eficiente del agua en la producción de semilla de maíz.

En general, la utilidad del agua total presentó diferencia en los ambientes con respuesta inversa a la cantidad de agua total. Los híbridos de cruce simple presentaron respuesta diferencial en la utilidad del agua total y en el rendimiento de semilla, las características genéticas en interacción con el ambiente presentaron efecto significativo.

Los híbridos presentaron utilidad del agua mayor al 100% en Cuautitlán respecto al ambiente de Texcoco como respuesta a las condiciones edáficas. Además, no se agregó riego y esta condición permitió el ahorro de agua.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

La información generada y analizada durante este estudio no está disponible públicamente, pero está disponible a través de la solicitud dirigida por correo al autor de correspondencia.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

FINANCIACIÓN

La investigación fue financiada por el programa de apoyo a los proyectos de investigación e innovación tecnológica (PAPIIT IA 105122 y PAPIIT IT200925) de la UNAM.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: H.A.S., M.T.R. y A.E.C. Metodología: H.A.S., M.T.R., B.Z.G. A.E.C. Software: H.A.S. y A.E.C. Validación: H.A.S. Análisis formal: H.A.S. y M.T.R. Investigación: H.A.S. y M.T.R. Recursos: H.A.S., M.T.R., A.E.C. y J.Z.E. Curación de datos: H.A.S., M.T.R. y A.E.C. Preparación del borrador original: H.A.S., M.T.R.; escritura, revisión y edición: H.A.S., M.T.R. y A.E.C. Visualización: H.A.S., M.T.R. y A.E.C. Supervisión: H.A.S. y M.T.R. Administración del proyecto: H.A.S. y M.T.R. Adquisición de fondos: H.A.S., M.T.R., A.E.C., B.Z.G., C.L.L. y J.Z.E.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación e innovación tecnológica PAPIIT IA105122. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM. Al proyecto de investigación e innovación tecnológica PAPIIT IT200925. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM.

LITERATURA CITADA

- Afandi, G., Khalis, F., & Ouda S. (2010). Using Irrigation scheduling to increase water productivity of wheat-maize rotation under clima change conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(3), 474-484.
- Allaknon, M. G. B., Zakari, S., Tovihoudji, P. G., Fatondji, A. S., & Akponikpè, P. I. (2022). Grain yield, actual evapotranspiration and water productivity responses of maize crop to deficit irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 270, 107746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107746>
- Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., López-López, C., Zaragoza-Esparza, J., Turrent-Fernández, A., & Mora-García, K. Y. (2025). Respuesta agronómica de híbridos de maíz bajo riego y secano en dos densidades de siembra en Valles Altos de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(2025), 1-13. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5757>
- 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, 1005-1016. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2118>
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. C. (2008). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Segunda Edición. Barcelona, España: McGraw-Hill.
- Castellanos, J. Z., Etchevers, B. J., Peña, D. M., García, H. S., Ortiz, M. I., Arango, G. A., ... & Venegas, V. C. (2022). ¿Cómo Crece y se Nutre una Planta de Maíz? Guanajuato, México: Fertilab. ISBN: 6079851709
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2005). Estadísticas del Agua en México Ediciones. Consultado el 13 de agosto, 2022, desde <http://www.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2025). Estadísticas del Agua en México. Consultado el 13 de abril, 2025, desde <http://www.conagua.gob.mx/>
- Doorenbos, J., Plusje, J. M. G. A., Kassam, A. H., Branscheid, V., & Bentvelsen, C. L. M. (1986). *Irrigation and Drainage, Paper N° 33: Yield response to wáter*. Rome, Italy: FAO.
- Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Meza-Guzmán, L. D., Arteaga-Escamilla, I., Matías-Bautista, D., Valdivia-Bernal, R., ... & Zamudio-González, B. (2010a). Eliminación de espiga y hojas en un híbrido de maíz androestéril y fértil. *Universidad y Ciencia*, 26(3), 215-224.
- Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Sierra-Macias, M., Caballero-Hernández, F., Valdivia-Bernal, R., & Gómez-Montiel, N. O. (2010b). Despanojado y densidad de la población en una cruza simple androestéril y fértil de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 21(1), 159-165. <https://doi.org/10.15517/AM.V21i1.4921>
- 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 Fitotecnica Mexicana*, 41(1), 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.
- Govaerts, B., Barrera-Franco, M. G., Limón-Ortega, A., Muñoz-Jiménez, P., Sayre, K. D., & Deckers, J. (2008). Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México. *Tropicultura*, 26(1), 2-9.
- 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, Z. J., Benítez, R. I., Vázquez, C. M., & Carrillo, S. J. (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.
- López, T., Cid, G., González, F., Herrera, J., & Chaterlán, Y. (2011). Modelación de la eficiencia del uso del agua en maíz y frijol en diferentes condiciones de suelos y disponibilidad hídrica. *Revista Ingeniería Agrícola*, 1(2), 42-47.
- Macchi, L. G., Rincón, S. F., Ruíz, T. N., & Castillo, G. F. (2010). Selección y mantenimiento de poblaciones, una perspectiva para la conservación *in situ* de la diversidad genética del maíz. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 33(4), 37-43.
- 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.
- Martínez-Lázaro, C., Mendoza-Onofre, L. E., García-de los Santos, G., Mendoza-Castillo, M.C. & Martínez-Garza, A. (2006). Rendimiento de grano de híbridos isogénicos de maíz formados mediante androesterilidad vs desespigamiento. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 29(4), 365-368.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10ª ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. ISBN: 978-1119722106
- Navarro, B. S., & Navarro, G. G. (2013). *Química Agrícola*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Palacios, V. E., & Excebio, G. A. (2020). *La Operación de los Sistemas de Riego con Apoyo de las Técnicas de la Información*. Texcoco, Estado de México, México: Colegio de Postgraduados.
- Pedroza-Sandoval, A., Ríos-Flores, J., Torres-Moreno, M., Cantú-Brito, J., Pícen-Sagarnaga, C., & Yáñez-Chávez, L. (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa* L.): impacto social y económico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 231-240.
- Quiroga-Cardona, J. (2019). Comportamiento del rendimiento y frecuencia en el tamaño de la semilla F1 de maíz (*Zea mays* L.) y su relación con la pérdida de hojas en el despanojado de líneas parentales. *Orinoquia*, 23(1), 85-91.
- 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). (2025). Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado el 23 de enero, 2025, desde <http://www.siap.gob.mx/>
- Su, W., Ahmad, S., Ahmad, I., & Han, Q. (2020). Nitrogen fertilization affects maize grain yield through regulating nitrogen uptake, radiation and water use efficiency, photosynthesis and root distribution. *PeerJ*, 8, e10291. <https://doi.org/10.7717/peerj.10291>
- Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Trejo-Pastor, V., Arteaga-Escamilla, I., Canales-Islas, E., Turrent-Fernández, A., ... & Zamudio-González, B. (2013). Eliminación de espiga y hojas en progenitores androestériles y fértiles de los híbridos trilineales de maíz 'H-47' y 'H-49'. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 36(3), 245-250.
- 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.
- Turrent-Fernández, A., Espinosa-Calderón, A., Cortés-Flores, J. I., & Mejía-Andrade, H. (2018). Análisis de la estrategia MasAgro-maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1531-1547. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i8.833>
- Velázquez-Cardelas, G. A., González-Huerta, A., Pérez-López, D. 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., Avila-Perches, M. A., Espinosa-Calderón, A., Arellano-Vázquez, J. L., & Gámez-Vázquez, A. J. (2014). Producción de semilla de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 323-335.
- Virgen-Vargas, J., Zepeda-Bautista, R., Avila-Perches, M. A., Espinosa-Calderón, A., Arellano-Vázquez, J. L., & Gámez-Vázquez, A. J. (2016). Producción y calidad de semilla de maíz en Valles Altos de México. *Agronomía Mesoamericana*, 27(1), 191-206. <https://doi.org/10.15517/am.v27i1.21899>