



RESPUESTA DE HÍBRIDOS SUBTROPICALES DE MAÍZ A LA DENSIDAD DE POBLACIÓN

RESPONSE OF SUBTROPICAL MAIZE HYBRIDS TO PLANT DENSITY

José Luis Ramírez-Díaz^{1*}, Ivone Alemán-de la Torre¹, Edgardo Bautista-Ramírez¹, Víctor A. Vidal-Martínez², Yolanda Salinas-Moreno¹ y Alejandro Ledesma-Miramontes¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. ²INIFAP, Campo Experimental Santiago Ixcuintla, Santiago Ixcuintla, Nayarit, México.

*Autor de correspondencia (ramirez.joseluis@inifap.gob.mx)

RESUMEN

En el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) la densidad de población es un componente importante de la producción de grano. Esta investigación tuvo como objetivo estudiar la respuesta en rendimiento de grano y características agronómicas de cinco híbridos experimentales de maíz al variar la densidad de población. Los híbridos y dos testigos se sembraron a 65, 75 y 90 mil plantas ha⁻¹ en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones con arreglo de tratamientos en parcelas divididas, donde la parcela grande incluyó las densidades de población y la chica los híbridos. La unidad experimental fue de cuatro surcos y la parcela útil los dos surcos centrales. La evaluación se hizo en Peña del Panal, Michoacán, México en punta de riego, y en Tepatitlán y San Miguel Cuyutlán, Jalisco, México en temporal. Se registraron datos de planta y de mazorca y se realizaron análisis estadísticos combinados a través de localidades. El rendimiento de los híbridos fue diferente al aumentar la densidad de población, los híbridos HE-48, HE-46, HE-15A y H-377 elevaron el rendimiento al incrementar la densidad de población; el comportamiento del híbrido H-377 fue muy dependiente de la densidad de población, con 65 mil plantas ha⁻¹ tuvo rendimiento de grano bajo y con 90 mil alcanzó su máximo rendimiento. Los híbridos HE-48 y HE-15A tuvieron rendimiento alto tanto en baja como en alta densidad. El rendimiento de grano en función de las densidades de población es un factor importante a considerar para la rentabilidad del cultivo, especialmente en siembras de maíz de temporal, pues en esas condiciones el rendimiento de grano disminuyó al aumentar la densidad de población.

Palabras clave: *Zea mays* L., acame, densidad óptima, potencial genético, rendimiento de grano.

SUMMARY

In maize (*Zea mays* L.) crop plant density is an important component of grain production. This research aimed to study the response of grain yield and agronomic characteristics of five experimental maize hybrids when varying plant density. The hybrids were planted along with two checks at 65, 75 and 90 thousand plants ha⁻¹ using a randomized complete blocks design with three replications with an split-plot arrangement where the whole plot included plant densities and the split-plot the hybrids. The experimental unit consisted of four rows and the useful plot included the two central rows. The evaluation was carried out at Peña del Panal, Michoacan, Mexico under irrigation, and at Tepatitlán and San Miguel Cuyutlán, Jalisco Mexico under rainfed conditions. Plant and ear data were registered and combined statistical analyses were performed across localities. The yield of hybrids was different as plant density

increased. Hybrids HE-48, HE-46, HE-15A and H-377 increased grain yield as the plant density increased; the performance of hybrid H-377 was different when increasing the plant density, at 65 thousand plants ha⁻¹ it had low grain yield and at 90 thousand it reached its maximum yield. Hybrids HE-48 and HE-15A had high performance in both low and high plant density. Grain yield as a function of plant densities is an important factor to consider for the profitability of the crop, especially in rainfed maize plantings, since under those conditions the grain yield decreased as the plant density increased.

Index words: *Zea mays* L., genetic potential, grain yield, lodging, optimum density.

INTRODUCCIÓN

Las densidades de población altas se emplean en maíz (*Zea mays* L.) para aumentar el rendimiento de grano o forraje (Reta *et al.*, 2000). El aumento en la tolerancia al acame de los híbridos de maíz en los Estados Unidos permitió incrementar las densidades de población y el rendimiento de grano en la segunda mitad del siglo XX (Duvick y Cassman, 1999). En Brasil, la respuesta en rendimiento de los híbridos a la densidad de población en la década de los 1990s fue mayor que la de los 1970s (Sangoi *et al.*, 2002). En México también se modificó la recomendación de la densidad de población en el maíz híbrido comercial de la región Centro Occidente; así, de 1980 a 2010 se cambió de 50 a 75 mil plantas ha⁻¹ (Ramírez *et al.*, 2010) y se ha señalado que para superar los rendimientos actuales de maíz será necesario aumentar aún más la densidad de población (Egli, 2015).

La respuesta de rendimiento del maíz híbrido a la densidad de población está relacionada con factores genéticos, ambientales y de manejo, maximizando las interacciones genotipo × ambiente y genotipo × densidad de población. En ambientes con restricción de humedad las densidades altas afectan negativamente el rendimiento, y variaciones en disponibilidad de humedad antes o después de la etapa R1 provocan inconsistencias en rendimiento de grano en

altas densidades de población (Assefa *et al.*, 2016; Reeves y Cox, 2013).

La respuesta en rendimiento a la densidad de población es diferente entre maíces híbridos (Sangoi, 2000), la cual generalmente sigue una función cuadrática (Assefa *et al.*, 2016). Hay híbridos con un diferencial pequeño o alto en rendimiento entre la baja y alta densidad (González *et al.*, 2018); la respuesta de los híbridos a la densidad se relaciona con la plasticidad en la producción de biomasa; híbridos con alta biomasa en densidades bajas tienen rendimiento bajo sembrados en altas densidades y viceversa; al respecto, la correlación entre el rendimiento de grano y la biomasa fue mayor que con el índice de cosecha (Sarlangue *et al.* (2007). Berzsenyi y Tokatlidis (2012), en un estudio realizado en Hungría, señalaron que la mayoría de los híbridos actuales son dependientes de la densidad de población, pues sólo expresan rendimiento alto en altas densidades de población.

Por otra parte, se encontró que las correlaciones entre progenitores e híbridos para determinar la densidad óptima de población, o el rendimiento en diferentes densidades, no fueron significativas, y tampoco pudo predecirse la densidad óptima de los híbridos con el promedio de sus progenitores (Amelong *et al.*, 2016). Con respecto al tipo de acción génica del rendimiento de grano y la densidad de población, se manifiestan más los efectos aditivos (Mansfield y Mumm, 2014), de tal manera que el rendimiento potencial por planta y por área son criterios de selección que deben aplicarse para obtener híbridos de maíz con rendimiento de grano alto sembrados en altas densidades de población, cuyos mecanismos biológicos parecen ser independientes (González *et al.*, 2018). El maíz sembrado en altas densidades de población maximiza el uso de radiación solar, pero hay que modificar la morfología y fenología de la planta para reducir efectos indeseables en el rendimiento de grano, tales como número de plantas sin mazorca (Sangoi, 2000), incremento en acame (Maya y Ramírez, 2002) por reducción en el número de las raíces nodales y laterales (Shao *et al.*, 2018), asincronía floral (Campos *et al.*, 2006) y reducción en el grosor del tallo hasta en 20 % (Testa *et al.*, 2016).

La información consultada destaca la respuesta diferencial del rendimiento del maíz híbrido a la densidad de población y la necesidad de conocer su respuesta para lograr el máximo rendimiento de grano con el menor riesgo; por tanto, el objetivo de esta investigación fue estudiar en cinco maíces híbridos experimentales y dos testigos comerciales la respuesta en rendimiento de grano y características agronómicas en función de distintas densidades de población.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

Se evaluaron siete híbridos trilineales del Programa de Maíz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con adaptación a la región Centro Occidente de México; cinco híbridos experimentales sobresalientes (HE), de los cuales cuatro son de grano blanco (HE-46, 47, 48 y 49), uno de grano amarillo (HE-15A) y dos testigos comerciales de grano blanco (H-318 y H-377). Los híbridos H-318 y H-377 se seleccionaron a una densidad de 62,500 plantas ha⁻¹ (Ramírez *et al.*, 2010) y los HE en densidades de entre 70 y 75 mil plantas ha⁻¹.

Densidades de población y diseño experimental

Los siete materiales se sembraron en tres densidades de población: 65, 75 y 90 mil plantas ha⁻¹, este espacio de exploración cubre las densidades más utilizadas en los sistemas de producción de maíz de temporal y punta de riego de la zona Centro Occidente de México. Los híbridos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela grande fue las densidades de población y la chica los híbridos. El tamaño de parcela fue de cuatro surcos de 4.0 m de largo distanciados a 0.80 m y la parcela útil fueron los dos surcos centrales. Las densidades de 65, 75 y 90 mil plantas ha⁻¹ se obtuvieron con 21, 24 y 29 plantas por surco, respectivamente.

Manejo agronómico

El experimento se estableció en el ciclo agrícola primavera-verano 2017 en las localidades de San Miguel Cuyutlán, municipio de Tlajomulco, Jalisco, en el Campo Experimental (CE) Centros-Altos del INIFAP municipio de Tepatitlán, Jalisco y en Peña del Panal, municipio de Tarímbaro, Michoacán, las cuales cubren un intervalo de 1350 a 1930 m de altitud. Las primeras dos localidades se sembraron en temporal y la tercera en punta de riego.

La siembra en Tepatitlán y Peña del Panal se realizó el 29 de junio y en San Miguel Cuyutlán el 5 de julio. En Peña del Panal se aplicaron dos riegos de auxilio en las etapas de antesis y grano lechoso. La siembra en las tres localidades fue manual. La fertilización en San Miguel Cuyutlán fue con la fórmula 250-60-60 de N-P-K aplicada a la siembra y a los 30 y 50 días después de la siembra (DDS) y se hicieron tres aplicaciones de fertilizante foliar Abonasa® en dosis de 3.0 L ha⁻¹. En Tepatitlán la fertilización se realizó con la fórmula 240-80-00 aplicada a la siembra y a los 20 y 40

DDS, y se aplicó fertilizante foliar Bayfolan® en dosis de 4.0 L ha⁻¹. En Peña del Panal se aplicó la fórmula 202-46-60 de N-P-K y una aplicación foliar compuesta con Kendal®, Megafol®, Brexil Mix® y Brexil® (Fe, Zn y Mn) en dosis de 1.0 L ha⁻¹ de cada producto. En todos los casos el fertilizante foliar se aplicó junto con el insecticida (Clorpirifos 0.75 L ha⁻¹) para control de plagas del follaje. No se evaluaron las dosis de fertilización debido a que el propósito principal fue conocer la respuesta del rendimiento de los híbridos a la densidad de población con la dosis media de fertilizantes utilizadas por el productor en cada localidad de estudio. En San Miguel Cuyutlán el experimento se cosechó el 21 de diciembre de 2017, en Peña del Panal el 15 de diciembre de 2017 y en Tepatitlán el 03 de enero de 2018.

Variables evaluadas

Se evaluó la variable rendimiento de grano, en kg ha⁻¹ (REND); se estimó en peso seco con la ecuación siguiente:

$$\text{REND} = \text{PC} \times \text{PMS} \times \text{PGR} \times \text{FC}$$

donde: PC: peso de campo por unidad experimental (kg); PMS: porcentaje de materia seca = (100 - porcentaje de humedad del grano)/100; PGR: porcentaje de grano; FC: factor de conversión a kg ha⁻¹ = 10,000/área de la parcela útil = 10,000/6.4 = 1562.5.

Adicionalmente se registró el número de días a floración masculina (FM) y femenina (FF), altura de planta (AP) y mazorca (AM), en cm, se determinaron con base en el manual para la descripción varietal en maíz (Carballo y Benítez, 2010). La FM y FF sólo se registró en Peña del Panal y Tepatitlán. Para acame de raíz (AR) se consideraron aquellas plantas caídas o desviadas en un ángulo mayor a 30° respecto a su vertical o con "cuello de ganso", y para acame de tallo (AT) aquellas quebradas o dobladas por debajo del nudo donde se inserta la mazorca principal (García *et al.*, 2001); el AR y AT se expresaron en porcentaje con respecto al número total de plantas de la parcela útil. El rendimiento de grano por planta (RGPP) se estimó en g, dividiendo el peso seco del grano de la parcela útil entre el número de plantas. El porcentaje de plantas horras (PHO) se registró como la relación entre el número de plantas sin mazorca y el total de plantas de la parcela útil multiplicado por 100; finalmente se calificó visualmente a la mazorca (CMZ), en escala de 1 a 5, donde 1 correspondió a mazorcas totalmente sanas y 5 a mazorcas completamente dañadas. El PHO sólo se registró en San Miguel Cuyutlán y Tepatitlán, mientras que CMZ sólo se midió en San Miguel Cuyutlán y Peña del Panal.

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza a través de localidades usando el paquete estadístico SAS® V 6.12 (SAS Institute, 1996) para un modelo mixto, considerando las repeticiones como aleatorias. También se realizó un análisis de regresión simple del rendimiento por planta de cada híbrido (variable dependiente) contra la densidad de población (variable independiente) para evaluar el efecto de interacción entre los factores principales. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa ($P \leq 0.05$) (Martínez, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de la varianza (Cuadro 1) hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre localidades para todas las variables. Entre densidades, las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano por planta, porcentaje de acame de raíz y tallo, días a floración masculina y femenina, porcentaje de plantas horras y calificación de mazorca. La interacción densidad × localidad resultó significativa ($P \leq 0.05$) para porcentaje de acame de tallo, días a floración masculina y femenina, calificación de mazorca y porcentaje de plantas horras no fue significativa ($P \leq 0.06$). En el factor híbridos las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$) para casi todas las variables, excepto porcentaje de acame de tallo y de plantas horras. En la interacción híbrido × localidad, hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para casi todas las variables, excepto porcentaje de acame de raíz y tallo, porcentaje de plantas horras y la calificación de mazorca ($P \leq 0.06$). En la interacción híbrido × densidad hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para rendimiento de grano, altura de la mazorca, días a floración femenina y calificación de mazorca, y en la interacción localidad × densidad × híbrido no hubo diferencias significativas en ninguna de las variables estudiadas. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Assefa *et al.* (2016) en el sentido de haber reportado una enorme variación entre los factores ambientes, genotipos y densidades de población, así como en la interacción genotipo × ambiente y genotipo × densidad de población.

El rendimiento de grano (REND) más alto a través de híbridos y densidades (11,878 kg ha⁻¹) se obtuvo en Peña del Panal, superior a los registrados en San Miguel Cuyutlán (5614 kg ha⁻¹) y Tepatitlán (4274 kg ha⁻¹). Entre estas dos últimas localidades, el REND resultó significativamente mayor en San Miguel Cuyutlán que en Tepatitlán. Las diferencias en REND entre localidades se debieron a la humedad disponible, en Peña del Panal no hubo restricción

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia estadística de siete híbridos de maíz evaluados en tres ambientes y en tres densidades de población.

FV	GL	REND	RPP	AP	AM	AR	AT	FM	FF	PHO	CMZ
Localidad	2	1,037,013,614**	126,734**	9009**	13,790**	202.6**	227.9**	2246.2**	1049**	312.4*	1.14**
Repetición	2	4,307,545	214.4	227.2	147.4	44.0**	30.1	0.1	0.64	121.2	0.18
Rep/Loc	4	2,261,556	295.8	629.9	321.4	41.0**	16.6	2.4	1.45	18.9	0.08
Densidad	2	277,474	10041**	104.3	207.5	7.6*	78.5*	6.43*	22.4**	114.6**	0.86**
Dens × Loc	4	1,624,430	212.3	547.9	252.2	5.2	63.6*	5.8*	22.6**	57.6	0.21
Dens × Rep/ Loc	12	974,038**	167.9*	377.6**	112.4*	2.0	1.3	1.1	1.6	14.1	0.087
Híbrido	6	2,169,434*	297.7*	5481.9**	946.3**	18.1*	34.3	28.9**	33.2**	85.5	0.24*
Hib × Loc	12	2,663,952**	429.4**	320.9*	214.5**	14.9	15.6	3.8**	6.6**	74.2	0.19
Hib × Rep/ Loc	36	775,438**	118.9*	152.8	67.3	7.8	1.5	1.5	1.8	66.0**	0.08
Dens × Hib	12	862,630*	160.8*	126.4	127.4*	8.5	0.72	2.4	3.2*	14.3	0.13**
Loc × Dens × Hib	24	523,831	79.4	165.7	64.6	6.0	0.57	2.4	1.5	13.2	0.07
Error	72	408,599	73.5	116.1	60.6	5.6	14.9	1.64	1.36	14.32	0.05
CV (%)		8.8	9.5	3.8	5.9	108.3	183.3	1.6	1.4	75.1	9.8
R ²		0.99	0.98	0.90	0.91	0.79	0.72	0.97	0.98	0.85	0.83

FV: fuente de variación, REND: rendimiento de grano, RPP: rendimiento de grano por planta, AP: altura de planta, AM: altura de mazorca, AR: porcentaje de acame de raíz, AT: porcentaje de acame de tallo, FM: floración masculina, FF: floración femenina, PHO: porcentaje de plantas horras, CMZ: calificación de mazorca. * y ** Valores significativos con $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente.

de humedad, pero en Tepatitlán y San Miguel Cuyutlán la precipitación fue menor que el promedio local en 11.9 y 30.3 %, respectivamente. El rendimiento de grano por planta (RPP) entre localidades tuvo la misma tendencia que el REND (Cuadro 2).

Las diferencias en REND y RPP entre las localidades de San Miguel Cuyutlán y Tepatitlán se explican más por la distribución de lluvia que por la cantidad precipitada, así como por las diferencias en altitud entre localidades. En cuanto a precipitación, de la siembra a la cosecha, en Tepatitlán se registraron 589.9 mm y en San Miguel Cuyutlán 453.3 mm, pero la distribución de la lluvia en función de la etapa fenológica de las plantas difirió entre localidades. En Tepatitlán hubo humedad suficiente desde la siembra hasta la floración masculina (FM) y femenina (FF) (85 d), lo que permitió a las plantas tener desarrollo vegetativo normal, alcanzar máxima altura de planta (298 cm), que hubiera fecundación (etapa R1) y el grano alcanzara la etapa acuosa (etapa R2) (Ritchie *et al.*, 1993), después de la etapa R2 hubo sequía hasta la madurez fisiológica. En San Miguel Cuyutlán hubo tres periodos de sequía, los dos primeros ocurrieron entre los 16 y 35, y entre los 50 y 56 días después de la siembra (DDS), los cuales afectaron el desarrollo vegetativo y redujeron la altura de planta (286 cm), después de la etapa R1 (69 días,

datos no presentados) e inicio de R2, se presentó el tercer periodo de sequía, entre los 71 y 84 DDS, pero en la etapa de grano lechoso (R3) hubo humedad, lo que permitió mejor llenado de grano que en Tepatitlán, luego hubo sequía hasta la madurez fisiológica (Cuadro 2 y Figura 1). Al respecto, Reeves y Cox (2013), Quiroz *et al.* (2017) y González *et al.* (2018) encontraron diferencias en REND y RPP entre localidades para maíz en trabajos similares.

El tipo de germoplasma y la altitud también fueron factores que influyeron en el bajo rendimiento de grano en la localidad de Tepatitlán, pues el germoplasma de los híbridos evaluados es de origen subtropical y la localidad de Tepatitlán se ubica en la zona de transición, a 1966 msnm, mientras que San Miguel Cuyutlán está en la zona subtropical (1554 msnm); esta diferencia en altitud ocasionó que en Tepatitlán la etapa de floración ocurriera 15 días después con respecto a San Miguel Cuyutlán, y ocasionó que el periodo de llenado de grano fuera menor. Al respecto, Cooper (1979) y Mercer y Perales (2019) encontraron que el número de días a floración y a madurez fisiológica en maíz se incrementó con la altitud, siendo la temperatura el factor más importante de variación.

El porcentaje de plantas horras en San Miguel Cuyutlán fue mayor que en Tepatitlán, pues la sequía ocurrida en

pre y post-antesis incrementa el número de plantas sin mazorca (Campos *et al.*, 2006), pero en Tepatitlán, con menos plantas horras, se tuvo un REND más bajo debido a que la sequía afectó más el llenado de grano que en San Miguel Cuyutlán porque el periodo fue más largo; resultados similares fueron encontrados por González *et al.* (2018) (Cuadro 2 y Figura 1).

En la Figura 1 se observa que del 1 de junio a la siembra en Tepatitlán (29 de junio) y en San Miguel Cuyutlán (5 de julio), la precipitación acumulada fue de 116.1 y 75 mm, respectivamente. Para aprovechar esta humedad, una práctica común en las regiones Centro y Altos de Jalisco es sembrar el maíz "en seco" la primera semana de junio,

ésto permite sembrar híbridos de ciclo intermedio-tardío, escapar a la sequía terminal y obtener rendimientos más altos, pero si hay sequía después de la primera semana de junio, como ocurrió en 2017, hay problemas de germinación por encostramiento, pérdida de plantas por sequía y bajos rendimientos de grano. Una opción en Tepatitlán sería sembrar genotipos cuya floración ocurra entre 75 y 78 días, lo que permitiría que la planta tenga un periodo de llenado de grano más largo tanto en siembras "en seco" como en retrasadas; en el caso de San Miguel Cuyutlán, la opción sería sembrar híbridos con 63 a 65 días a la floración.

Con respecto a las densidades de población, no hubo diferencias significativas en REND entre ellas. El promedio

Cuadro 2. Promedios de rendimiento de grano y características agronómicas de siete híbridos evaluados en tres densidades de población en función de la localidad de prueba.

Localidad	RED	RPP	Floración (d)		Acame (%)		Altura (cm)		PHO (%)	CMZ (1-5)
	(kg ha ⁻¹)	(g)	Masc	Fem	Raíz	Tallo	Pta	Maz		
Peña del Panal	11875a	141a	76a	77a	0.9b	2.3b	280b	149a		2.35a
San Miguel Cuyutlán	5614b	73b			4.2a	3.9a	276b	121b	6.6a	2.16b
Tepatitlán	4274c	57c	85b	85b	1.4b	0.1c	298a	125b	3.5b	
DMS (0.05)	744	9	1.2	1.3	3.2	2.0	12	8.9	3.3	0.21

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. REND: rendimiento de grano ha⁻¹, RPP: rendimiento de grano por planta, PHO: porcentaje de plantas horras, CMZ: calificación de mazorca.

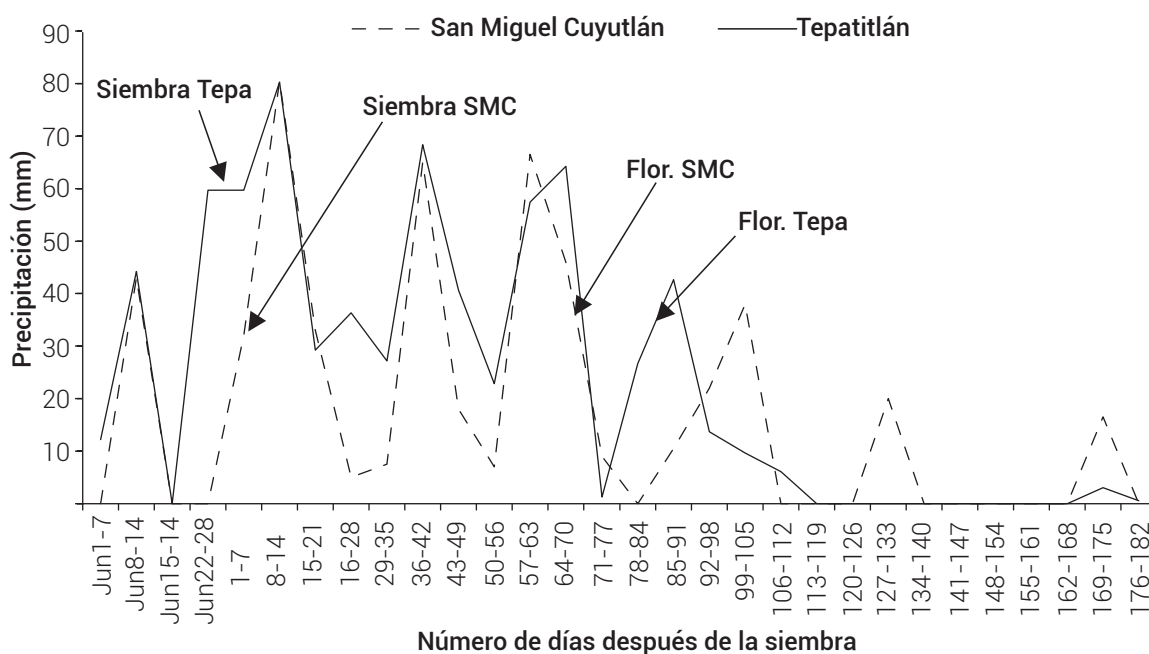


Figura 1. Precipitación acumulada distribuida en periodos de siete días, de junio 1 a 28, y de la siembra a la cosecha, 176 a 182 días, en Tepatitlán (Tepa) y San Miguel Cuyutlán (SMC), Jalisco, 2017.

más alto se obtuvo con 90 mil plantas ha⁻¹, pero éste sólo fue de 24 y 125 kg ha⁻¹ mayor que el obtenido con 65 y 75 mil plantas ha⁻¹. En otros estudios se han asociado los incrementos en REND con las altas densidades de población (Duvick y Cassman, 1999; Egli, 2015), pero si hay condiciones de sequía, como en Tepatitlán y San Miguel Cuyutlán, se espera que no haya respuesta favorable en REND en densidades altas, e incluso ésta puede ser negativa (Assefa *et al.*, 2016; Reeves y Cox, 2013). En los últimos tres años, en el centro de Jalisco la precipitación ha sido errática y mal distribuida; por lo tanto, para reducir pérdidas de REND y mejorar la rentabilidad al productor de maíz le convendría sembrar entre 70 y 75 mil semillas ha⁻¹, en lugar de las 80 y 85 mil que suelen utilizar (Cuadro 3).

El RPP disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) al aumentar la densidad de población; resultados similares fueron encontrados por González *et al.* (2018), Berzsenyi y Tokatlidis (2012), Sarlangue *et al.* (2007) y Hashemi *et al.* (2005), quienes argumentaron que ésto se debe a que aumenta la competencia entre plantas y se incrementa significativamente el porcentaje de plantas horras (Hashemi *et al.*, 2005); no obstante, en este estudio la reducción en RPP y el aumento de plantas horras se compensaron con el REND por área obtenido con el aumento en el número de plantas sembradas. Por otro lado, en las densidades altas se observó un incremento en el porcentaje de acame, pero los valores fueron bajos debido a que con la sequía se reduce el RPP y con ello el acame de raíz y tallo (Maya y Ramírez, 2002; Reeves y Cox, 2013; Shao *et al.*, 2018) (Cuadro 3).

La interacción localidades × densidad no fue significativa para REND y RPP, pero en las localidades sembradas en temporal y donde hubo sequía, REND fue menor al aumentar la densidad de población, mientras que en punta de riego se incrementó; resultados similares se obtuvieron por Assefa *et al.* (2016) al cambiar el ambiente

de producción y por Reeves y Cox (2013) cuando hubo sequía (Cuadro 4).

En las tres localidades el RPP disminuyó al aumentar la densidad de población porque aumentó la competencia entre plantas (Hashemi *et al.*, 2005), las reducciones en RPP en Peña del Panal y San Miguel Cuyutlán fueron significativas ($P \leq 0.01$), del orden de -15.5 y -13.5 g por planta, y en Tepatitlán fue la más baja, -9.0 g por planta, debido a que la sequía se prolongó de las etapas R1-R2 hasta madurez fisiológica. Por otro lado, el acame de tallo se incrementó con la densidad de población, pero en ningún caso resultó significativo. Para el caso de Tepatitlán, el acame de tallo fue menor de 1 % debido al efecto de la sequía, lo cual coincide con lo señalado por Reeves y Cox (2013), quienes observaron menores porcentajes de acame cuando hubo sequía (Cuadro 4).

Con respecto a los híbridos, HE-48 rindió más ($P \leq 0.05$) que los testigos H-318 y H-377 y los híbridos experimentales HE-47 y HE-49, e igualó estadísticamente a HE-46 y HE-15A (Cuadro 5). Es de notar que el híbrido HE-48 tuvo el mayor porcentaje de plantas horras (10 %) y significativamente ($P \leq 0.01$) la mayor altura de planta (307 cm); ésto indica que su REND estuvo asociado con una alta producción de biomasa y rendimiento de grano por planta. Una asociación similar fue encontrada por Sarlangue *et al.* (2007), y a este tipo de híbridos los clasificaron como plásticos. El RPP siguió una tendencia similar a REND y la correlación fue positiva, $r = 0.897$ y significativa ($P \leq 0.01$). El porcentaje de acame total fue menor de 7 %, debido en gran parte a la sequía registrada en Tepatitlán y San Miguel Cuyutlán, lo cual ya había sido informado por Reeves y Cox (2013) cuando hay condiciones de sequía, pero sólo el porcentaje de acame de raíz fue significativo ($P \leq 0.05$). Los híbridos H-318 y HE-47 presentaron los porcentajes más altos de acame, H-377 y HE-46 los más bajos y HE-48 y HE-49 tuvieron valores cercanos al promedio (Cuadro 5).

Cuadro 3. Rendimiento promedio de grano y características agronómicas de siete híbridos de maíz en función de la densidad de población.

Densidad (plantas ha ⁻¹)	REND (kg ha ⁻¹)	RPP (g)	Floración (d)		Acame (%)		Altura (cm)		PHO (%)	CMZ (1-5)
			Masc	Fem	Raíz	Tallo	Pta	Maz		
65000	7280	103a	80.4b	80.5b	2.1b	1.0b	285	131	3.5b	2.12b
75000	7179	90b	80.5b	80.8b	1.9b	2.2ab	283	130	4.8b	2.24b
90000	7304	78c	81.1a	81.9a	2.6a	3.2a	286	134	6.8a	2.40a
DMS (0.05)	ns	5	0.5	0.6	0.6	1.7	ns	ns	1.9	0.15

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales. REND: rendimiento de grano por ha⁻¹, RPP: rendimiento de grano por planta, PHO: porcentaje de plantas horras, CMZ: calificación de mazorca.

Cuadro 4. Regresión lineal del rendimiento de grano y características agronómicas en función del ambiente y la densidad de población.

Localidad	Densidad de población			Coeficiente de regresión	Pr > t	R²
	65,000	75,000	90,000			
Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)						
San Miguel						
Cuyutlán	5825	5626	5390	-218	0.03	1.00
Tepatitlán	4359	4205	4258	-51	0.55	0.42
Peña del Panal	11655	11705	12264	147	0.29	0.81
Rendimiento de grano por planta (g)						
San Miguel						
Cuyutlán	86	72	59	-13.5	0.01	1.00
Tepatitlán	67	55	49	-9.0	0.12	0.96
Peña del Panal	157	141	126	-15.5	0.01	1.00
Acame de tallo (%)						
San Miguel						
Cuyutlán	2.6	5.3	3.9	0.65	0.68	0.23
Tepatitlán	0.0	0.2	0.2	0.1	0.33	0.75
Peña del Panal	0.3	1.1	5.5	2.6	0.24	0.86

Cuadro 5. Promedio de rendimiento de grano y características agronómicas en función del híbrido.

Híbrido	REND (kg ha ⁻¹)	RPP (g)	Floración (d)		Acame (%)		Altura (cm)		PHO (%)	CMZ (1-5)
			Masc.	Fem.	Raíz	Tallo	Planta	Mazorca		
H-318	6888	89	79	79	3.1	3.5	275	121	5	2.4
H-377	7147	88	81	80	2.0	0.9	269	128	4	2.2
HE-46	7318	91	81	81	1.0	1.1	275	130	4	2.3
HE-47	7057	87	81	82	1.6	3.8	297	132	5	2.4
HE-48	7717	96	78	80	2.0	2.2	307	135	10	2.3
HE-49	7142	88	83	83	2.2	2.0	276	137	4	2.2
HE-15A	7511	94	82	82	3.4	1.4	291	138	5	2.1
Media	7254	90	81	81	2	2	285	132	5	2.3
CV (%)	8.8	9.5	1.6	1.4	108.3	183.3	3.8	5.9	75.1	9.8
DMS (0.05)	486	6	1	1	1.5	-	7	5	-	0.20
Prob. F	0.02	0.04	<.0001	<.0001	0.05	ns	<.0001	<.0001	ns	0.02
R ²	0.99	0.98	0.97	0.98	0.8	0.7	0.90	0.91	0.85	0.83

REND: rendimiento de grano, RPP: rendimiento de grano por planta, PHO: porcentaje de plantas horras, CMZ: calificación de mazorca.

La interacción híbridos x localidades resultó significativa ($P \leq 0.05$) para REND y RPP (Cuadro 1), la ausencia de paralelismo en el comportamiento de los materiales a través de localidades se debió a las diferencias genéticas entre los híbridos y a las condiciones de sequía que se presentaron en Tepatitlán y San Miguel Cuyutlán, resultados similares fueron encontrados por Assefa *et al.*, (2016) y Reeves y Cox (2013), quienes señalaron que cuando hay sequía el rendimiento de los híbridos es inconsistente a través de localidades y densidades de población.

Con respecto a las reducciones en REND y RPP a través de localidades, las más altas se registraron en los híbridos HE-49 (-4625 kg ha⁻¹ y -52 g planta⁻¹) y HE-15A (-4128 kg ha⁻¹ y -47 g planta⁻¹), pero ni estas reducciones, ni las registradas en el resto de los híbridos fueron significativas; no obstante, las diferencias en valor de los coeficientes de regresión confirman la interacción de los híbridos a través de las localidades de evaluación (Cuadro 6).

La significancia ($P \leq 0.05$) en la interacción híbridos x densidades para REND (Cuadro 1) se explica por la respuesta diferencial que tuvieron los híbridos a través de las densidades de población evaluadas. Los híbridos H-318, HE-47 y HE-49 redujeron su REND al aumentar la densidad de población, mientras que los híbridos H-377, HE-46 y HE-15A lo incrementaron. En el mismo tenor, Hernández *et al.* (2014) encontraron una respuesta diferencial en híbridos de maíz al variar la densidad de población; sin embargo, en esta investigación el coeficiente de regresión entre el REND y la densidad de población no fue significativo en ninguno de los híbridos evaluados, debido probablemente a que faltó evaluar más localidades o ampliar la evaluación a través de años (Cuadro 7).

En Peña del Panal, donde se sembró en punta de riego, los híbridos H-318, HE-47 y HE-49 tuvieron una respuesta negativa en REND cuando se incrementó la densidad con coeficientes de regresión de -354, -150 y -32 kg ha⁻¹, respectivamente, por lo que estos híbridos no deberían sembrarse en densidades mayores de 65 mil plantas ha⁻¹; en cambio, el REND del híbrido HE-48 se incrementó en 726 kg ha⁻¹ al aumentar la densidad, resultado que contrasta con el obtenido a través de localidades (22 kg ha⁻¹). Con 75 mil plantas ha⁻¹ en San Miguel Cuyutlán y Tepatitlán se tuvo el porcentaje más alto de plantas horras (Cuadro 5), indicando que su mejor respuesta en REND sería en ambientes sin limitaciones de humedad (Cuadros 6 y 7). Kamara *et al.* (2006) no encontraron respuesta contrastante a la densidad de población en REND entre híbridos nuevos y antiguos de maíz y lo atribuyeron al efecto del ambiente y a que la selección de los híbridos se hizo en una densidad baja de población.

El rendimiento de grano por planta, a diferencia del REND, disminuyó al aumentar la densidad de población y varió en función del híbrido; así, en los híbridos H-318 y HE-47 las reducciones fueron altas y significativas ($P \leq 0.05$), los híbridos HE-48 y HE-15A tuvieron valores altos no significativos, mientras que la reducción más baja se registró en el híbrido H-377 (Cuadro 7). Hashemi *et al.* (2005) también encontraron que el RPP se redujo al aumentar la densidad de población.

Los híbridos experimentales (HE) tuvieron respuesta contrastante en REND en función de la densidad de población con respecto a los híbridos testigo H-318 y H-377, pero las respuestas diferenciales entre los HE se debieron a la inconsistencia que hay en los HE por efecto de la sequía, como lo señalaron Reeves y Cox (2013), los

Cuadro 6. Coeficientes de regresión del rendimiento de grano (kg ha⁻¹) y el rendimiento de grano por planta (g) en función de la localidad de evaluación.

Híbrido	Localidades de evaluación			Coeficiente de regresión	Pr > t	R ²
	P. del Panal	S. Miguel Cuy.	Tepatitlán			
H-318	10783 (133)	5430 (71)	4450 (63)	-3167 (-35)	0.24 (0.27)	0.86 (0.83)
H-377	11531 (135)	5879 (76)	4029 (54)	-3751 (-41)	0.18 (0.16)	0.92 (0.94)
HE-46	11661 (137)	6082 (80)	4211 (55)	-3725 (-41)	0.18 (0.14)	0.92 (0.95)
HE-47	11581 (139)	5046 (64)	4543 (59)	-3519 (-40)	0.29 (0.30)	0.80 (0.80)
HE-48	12423 (148)	5681 (73)	5048 (67)	-3688 (-41)	0.28 (0.29)	0.81 (0.81)
HE-49	12626 (148)	5423 (70)	3376 (45)	-4625 (-52)	0.20 (0.18)	0.90 (0.92)
HE-15A	12517 (151)	5754 (74)	4261 (56)	-4128 (-47)	0.22 (0.22)	0.88 (0.88)

Los valores entre paréntesis corresponden al rendimiento de grano por planta.

Cuadro 7. Regresión lineal del rendimiento de grano y del rendimiento de grano por planta en función del híbrido y la densidad de población.

Híbrido	Densidad de población			Coeficiente de regresión	Pr > t	R ²
	65,000	75,000	90,000			
H-318	7249 (104)	6681 (89)	6732 (75)	-259 (-14.9)	0.39 (0.02)	0.68 (1.0)
H-377	6712 (94)	7247 (91)	7481 (79)	385 (-7.1)	0.14 (0.22)	0.95 (0.89)
HE-46	7121 (102)	7403 (91)	7430 (79)	155 (-11.7)	0.28 (0.01)	0.82 (1.0)
HE-47	7321 (103)	7000 (86)	6849 (73)	-236 (-15.1)	0.13 (0.04)	0.96 (1.0)
HE-48	7962 (115)	7185 (89)	8006 (84)	22 (-15.3)	0.97 (0.25)	0.002 (0.85)
HE-49	7197 (101)	7277 (90)	6951 (73)	-123 (-14.3)	0.48 (0.07)	0.52 (0.99)
HE-15A	7397 (105)	7458 (92)	7677 (85)	140 (-10.1)	0.20 (0.09)	0.9 (0.98)

Los valores entre paréntesis corresponden al rendimiento de grano por planta.

criterios y ambiente de selección y el tipo de germoplasma. En densidades de población la evaluación cambió de 50 a 75 mil plantas ha⁻¹ (Ramírez *et al.*, 2010), pero este criterio de selección consideró sólo el rendimiento por área y omitió el potencial de rendimiento por planta (González *et al.*, 2018), la producción de materia seca de los híbridos (Sarlangue *et al.*, 2007) y la respuesta de los progenitores a las altas densidad de población (Amelong *et al.*, 2016). Con este enfoque se obtuvieron híbridos cuyo REND es dependiente de la densidad de población, tal es el caso del híbrido H-377, que con 65 mil plantas ha⁻¹ tiene REND y RPP bajos y con 90 mil plantas ha⁻¹ expresa REND máximo, aunque los híbridos HE-48 y HE-15A resultaron menos dependientes de la densidad porque tuvieron REND alto en baja y alta población; este comportamiento se debió a diferencias genotípicas entre los híbridos, pues todos se obtuvieron aplicando la misma metodología de selección.

Berzsenyi y Tokatlidis (2012) destacaron que seleccionar híbridos cuyo REND no dependa de la densidad de población tiene ventajas en ambientes restrictivos de humedad, debido a que se reducirían pérdidas de REND cuando haya periodos de sequía y se incrementaría REND si se reanudan las lluvias, lo cual es común en regiones que siembran de temporal con altas densidades de población. Por otro lado, para aumentar la eficacia en la selección de híbridos de maíz en función de la densidad de población debe diseñarse un esquema de selección que integre los componentes rendimiento potencial por planta y rendimiento por área, lo cual es posible debido a que éstos son independientes (González *et al.*, 2018), complementando con la selección de características para mejorar el arquetipo de la planta y la tolerancia al acame.

CONCLUSIONES

Los híbridos HE-48, HE-46 y HE-15A elevaron su rendimiento al incrementar la densidad de población en promedio de las tres localidades. El híbrido H-377 se comportó como dependiente de la densidad de población, pues a 65 mil plantas ha⁻¹ tuvo un rendimiento de grano bajo y en 90 mil tuvo un rendimiento alto. Los híbridos experimentales HE-48 y HE-15A fueron menos dependientes de la densidad porque su rendimiento de grano fue alto en baja y alta densidad. La respuesta en rendimiento de grano de los híbridos a través de densidades de población es un factor importante a considerar para no disminuir la rentabilidad del cultivo, especialmente en siembras de maíz de temporal, ya que con déficit de humedad el rendimiento de grano disminuye al aumentar la densidad de población.

BIBLIOGRAFÍA

- Amelong A., F. Hernández, A. D. Novoa and L. Borrás (2016) Maize stand density yield response of parental inbred lines and derived hybrids. *Crop Science* 57:32-39, <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.02.0083>
- Assefa Y., P. V. V. Prasad, P. Carter, M. Hinds, G. Bhalla, R. Schon, ... and I. A. Ciampitti (2016) Yield responses to planting density for US modern corn hybrids: a synthesis-analysis. *Crop Science* 56:2802-2817, <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0215>
- Berzsenyi Z. and I. S. Tokatlidis (2012) Density dependence rather than maturity determines hybrid selection in dryland maize production. *Agronomy Journal* 104:331-336, <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0205>
- Campos H., M. Cooper, G. O. Edmeades, C. Löffler, J. R. Schussler and M. Ibañez (2006) Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the US Corn Belt. *Maydica* 51:369- 381.
- Carballo C. A. y A. Benítez V. (2010) Manual Gráfico para la Descripción Varietal del Maíz (*Zea mays* L.). Segunda edición. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Colegio de Postgraduados. Tlalnepantla, Estado de México. 114 p.

- Cooper P. J. M. (1979) The association between altitude, environmental variables, maize growth and yields in Kenya. *The Journal of Agricultural Science* 93:635-649, <https://doi.org/10.1017/S0021859600039058>
- Duvick D. N. and K. G. Cassman (1999) Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Science* 39:1622-1630, <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961622x>
- Egli D. B. (2015) Is there a role for sink size in understanding maize population-yield relationships? *Crop Science* 55:2453-2462, <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0227>
- García M., C. Watson y F. Salcedo F. (2001) Evaluación de métodos para determinar resistencia al acame de raíces en maíz dulce (*Zea mays* L.). *Bioagro* 13:22-31.
- Gonzalez V. H., M. Tollenaar, A. Bowman, B. Good and E. A. Lee (2018) Maize yield potential and density tolerance. *Crop Science* 58:472-485, <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.06.0547>
- Hashemi A. M., S. J. Herbert and D. H. Putnam (2005) Yield response of corn to crowding stress. *Agronomy Journal* 97:839-846, <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0241>
- Hernández F., A. Amelong and L. Borrás (2014) Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal* 106:2316-2324. <https://doi.org/10.2134/agronj14-0183>
- Kamara A. Y., A. Menkir, I. Kureh, L. O. Omoigui and F. Ekeleme (2006) Performance of old and new maize hybrids grown at high plant densities in the tropical Guinea savanna. *Communications in Biometry and Crop Science* 1:41-48.
- Mansfield B. D. and R. H. Mumm (2014) Survey of plant density tolerance in U.S. maize germplasm. *Crop Science* 54:157-173, <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0252>
- Martínez G. A. (1996) Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría. Editorial Trillas. México D. F. 756 p.
- Maya L. J. B. y J. L. Ramírez D. (2002) Respuesta de híbridos de maíz a la aplicación de potasio en diferentes densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25:333-338.
- Mercer K. L. and H. Perales (2019) Structure of local adaptation across the landscape: flowering time and fitness in Mexican maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) landraces. *Genetic Resources and Crop Evolution* 66:27-45, <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0693-7>
- Quiroz M. J., D. J. Pérez L., A. González H., M. Rubí A., F. Gutiérrez R., J. R. P. Franco M. y J. F. Ramírez D. (2017) Respuesta de 10 cultivares de maíz a la densidad de población en tres localidades del centro mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1521-1535, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.508>
- Ramírez D. J. L., M. Chuela B., V. A. Vidal M., H. L. Vallejo D., R. Ramírez Z., A. Peña R., ... y L. Soltero D. (2010) H-377. Híbrido de maíz de grano blanco para riego y buen temporal para la zona centro occidente de México. Folleto Técnico Núm. 3. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, INIFAP. Tepatlán de Morelos, Jalisco. 32 p.
- Reeves G. W. and W. J. Cox (2013) Inconsistent responses of corn to seeding rates in field-scale studies. *Agronomy Journal* 105:693-704, <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0008>
- Reta S. D. G., A. Gaytán M. y J. S. Carrillo A. (2000) Respuesta del maíz para ensilaje a métodos de siembra y densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23:37-47.
- Ritchie W. S., J. J. Hanway and G. O. Benson (1993) How a corn plant develops. Special Report No. 48. Cooperative Extension Service. Iowa State University. Ames, Iowa, USA. 21 p.
- Sangoi L. (2000) Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ciência Rural* 31:159-168, <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000100027>
- Sangoi L., M. A. Gracietti, C. Rampazzo and P. Blanchetti (2002) Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. *Field Crop Research* 79:39-51, [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00124-7)
- Sarlangue T., F. H. Andrade, P. A. Calviño and L. C. Purcell (2007) Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agronomy Journal* 99:984-991, <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0205>
- SAS Institute (1996) SAS Software Release V 6.12, SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA. 830 p.
- Shao H., T. Xia, D. Wu, F. Chen and G. Mi (2018) Root growth and root system architecture of field-grown maize in response to high planting density. *Plant and Soil* 430:395-411, <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3720-8>
- Testa G., A. Reyneri and M. Blandino (2016) Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacing. *European Journal of Agronomy* 72:28-37, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.006>