

**EFICIENCIA DE LA PROLIFICIDAD EN MAÍZ (*Zea mays*) COMO MECANISMO DE
COMPENSACIÓN DEL RENDIMIENTO A BAJAS DENSIDADES**

Trabajo Final de Grado
del alumno



**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.**

Pergamino, 21 de febrero del 2022

**EFICIENCIA DE LA PROLIFICIDAD EN MAÍZ (*Zea mays*) COMO MECANISMO DE
COMPENSACIÓN DEL RENDIMIENTO A BAJAS DENSIDADES**

Trabajo Final de Grado

del alumno

ALEXIS RUBÉN CLOBAS CÉLIZ

Aprobada por el Tribunal Evaluador

Ing. Agr. (MSc) Carlos Senigagliesi
Evaluador

Ing. Agr. Omar Scheneiter
Evaluador

Dra. Raquel Defacio
Evaluadora

Ing. Agr. Roberto D. Lorea
Tutor

Ing. Agr. Esteban L. Martinez
Co-Director

Ing. Agr. Agustín O. Galaretto
Director

**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales,
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires**

Pergamino, 21 de febrero del 2022

Índice

1. Resumen	4
2. Introducción	5
a. El cultivo de maíz en Argentina	5
b. Generación de rendimiento	5
c. Prácticas de manejo de cultivo habituales en Argentina	7
d. Mecanismos de compensación	8
3. Hipótesis	10
4. Objetivo general	10
5. Objetivos específicos	10
6. Palabras claves	10
7. Materiales y métodos	10
8. Conducción de los experimentos	11
9. Variables analizadas en el cultivo	11
10. Análisis estadísticos	12
11. Resultados	13
a. Supuestos	13
b. Caracterización de los híbridos por prolificidad	13
c. Prolificidad	18
d. Rendimiento (Rto)	18
e. Numero de granos por metro cuadrado (NG.m ⁻²)	19
f. Número de granos por espiga (NG.E ⁻¹)	20
g. Peso de granos (PG)	20
h. Numero de granos y rendimiento por planta (NG.pl ⁻¹ y Rto.pl ⁻¹)	21
i. Capacidad de compensación	21
i. Capacidad de compensación del rendimiento (Rto)	21
ii. Capacidad de compensación a partir de los principales componentes numéricos (NG.m ⁻² y PG)	22
iii. Capacidad de compensación a partir del rendimiento por planta (Rto.pl ⁻¹) y número de granos por planta (NG.pl ⁻¹)	22
j. Correlaciones	23
12. Discusión	26
13. Conclusiones	30
14. Bibliografía	31
15. Anexos	35

Resumen

Las fechas de siembra y la densidad de plantas, son dos estrategias importantes de manejo del cultivo de maíz que afectan los componentes del rendimiento. La elección de la densidad de siembra es un aspecto del manejo técnico que depende del potencial ambiental de la región. Esto conlleva a que, en los alrededores de la zona núcleo y hacia ambientes de menor potencial productivo con condiciones propensas a la sequía, la densidad adoptada por los productores consista en una población relativamente baja en busca de maximizar el rendimiento del maíz a través de una menor competencia entre plantas. Esta estrategia de manejo defensivo iría acompañada de la utilización de híbridos prolíficos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia de compensación del rendimiento en híbridos prolíficos y no prolíficos de maíz a bajas densidades.

El ensayo se realizó a campo en la localidad de Pergamino en el campo experimental del Criadero de Semillas ACA (33°54'38.59"S, 60°38'31.84"O) en la campaña 2019/2020. El experimento se sembró bajo un diseño factorial en bloques con 3 repeticiones. Se implementaron tres densidades de siembra diferentes: 8 plantas.m⁻², 6 plantas.m⁻² y 4 plantas.m⁻². A cada unidad experimental se le asignó uno de cuatro híbridos pertenecientes a dos grupos de prolificidad, prolíficos (P) y no prolíficos (NP). No se presentaron diferencias en el rendimiento entre grupos de prolificidad al aumentar la disponibilidad de recursos por planta, mostrando, ambos grupos, una reducción del rendimiento en igual proporción al disminuir la densidad de siembra. Sin embargo, los híbridos difirieron en su capacidad de compensación. Los híbridos prolíficos aumentaron el número de granos, en tanto que los no prolíficos aumentaron el peso de los mismos.

Introducción

El cultivo de maíz en Argentina

A partir de la introducción de los primeros híbridos de maíz en la década de 1950 y su gran difusión en la década de 1960, los rendimientos de maíz en Argentina han aumentado sostenidamente. La notable mejora genética lograda (en potencial de rendimiento y en tolerancia a estrés, enfermedades, vuelco, etc.) fue en buena medida responsable de ese crecimiento, acompañada por mejoras en el manejo de los cultivos (fertilización, herbicidas, mecanización, etc.). El maíz es hoy mucho más que un cultivo. Es uno de los tres cereales de los que depende la humanidad para proveerse de alimentos y derivados industriales. Para la economía nacional constituye uno de los rubros productivos más importantes, y su trama productiva e industrial asociada genera valor agregado, empleo y riqueza nacional (Eyhérbide, 2012).

Dentro de las especies cultivadas, el maíz ocupa el primer lugar de importancia en el mundo en cuanto a volumen de producción. Tiene una gran relevancia económica a nivel mundial, ya sea como alimento humano, alimento para el ganado (grano, burlanda y forraje), fuente de numerosos subproductos industriales (Andrade et al., 1996) y producción de bio-combustibles. La producción mundial de maíz es de 1.148 millones de toneladas (t), producidas en 197 millones de hectáreas (ha) y con un rendimiento (Rto) promedio de 5,8 t.ha⁻¹. Entre los principales países productores se encuentra Estados Unidos en primer lugar, luego le sigue Brasil y Argentina. En cuanto a los principales países exportadores, Estados Unidos ocupa el primer lugar, seguido por Brasil, Argentina y Ucrania (FAO, 2019).

En Argentina, en la campaña 2020/2021 el área sembrada fue de 6,6 millones de ha, con un rinde promedió de 7,86 t.ha⁻¹, dando una producción de 50,5 millones de t. Del total de la producción nacional, Argentina exportó 35 millones de t (Bolsa de Cereales, 2021). La producción se extiende desde la región norte del país hasta el sur de la provincia de Buenos Aires a través de una gran diversidad de climas y ambientes. Los mejores niveles de producción se obtienen en la zona núcleo, comprendida por el noroeste de la provincia de Buenos Aires, el sur de Santa Fe y el oeste de Córdoba, alcanzando valores promedio de 10 t.ha⁻¹ (Bolsa de Cereales, 2021).

Generación de rendimiento

El Rto en grano queda determinado por la manera en que el cultivo particiona la biomasa acumulada durante su crecimiento entre los órganos de cosecha y el resto de la planta.

El Rto en maíz puede ser estudiado a través de sus componentes numéricos: el número de granos (NG) por unidad de superficie y su peso individual (PG). El NG es producto del número de plantas por unidad de superficie, del número de espigas (NE) granadas por planta (prolificidad) y del NG por espiga. El PG es función de la duración del período de llenado y de la tasa de llenado (gr.día^{-1}) (Cirilo & Andrade, 1994).

El Rto está más asociado al número final de granos logrados que al peso de estos. De los aspectos determinantes del NG, la generación de estructuras capaces de dar origen a un grano no sería un factor determinante del número final que alcanza la madurez. Para lograr aumentos de rendimiento es más importante aumentar la supervivencia de dichas estructuras que el número potencial de granos (Cirilo & Andrade, 1994; Otegui et al., 1995).

El NG queda establecido en un período de 30 días centrado en la floración: período crítico (PC). La incidencia de un estrés hídrico o lumínico provoca mayores mermas en el NG cuando tiene lugar en este período (Hall et al., 1981, Fischer & Palmer, 1984, Kiniry & Ritchie, 1985), ya que coincide con el crecimiento activo de la espiga, la emergencia de estigmas y el inicio del llenado del grano (Maddonni et al., 1998).

De esta manera, durante la primera mitad del PC, previa a la aparición de los estigmas, queda determinado el NE por planta capaces de granar, mientras que en la segunda mitad se determina el NG fijados por espiga granada. La relación entre el NG por planta y la tasa de crecimiento por planta durante el PC es curvilínea, con un umbral de tasa de crecimiento de planta al comienzo de la fijación de grano (Edmeades & Daynard, 1979; Tollenaar, 1992; Vega et al., 2001a; Echarte et al., 2004). De acuerdo con esto, el número de granos por planta (NG.pl^{-1}) es cero a baja tasa de crecimiento por planta y alcanza un valor máximo cuando la tasa de crecimiento por planta se encuentra por debajo de la máxima alcanzable en condiciones de campo. (Tollenaar et al., 1992; Vega et al., 2001b). Esta respuesta constituye la base de una fuerte interacción entre la densidad de planta, el Rto y la disponibilidad de recursos (agua, nitrógeno y luz) alrededor del período de floración (Andrade, 1995; Andrade et al., 1999; Echarte et al., 2000).

La mayor parte de las flores diferenciadas en las dos espigas superiores de la planta de maíz (una flor fértil por espiguilla) alcanza un desarrollo floral completo y todas en la espiga apical logran exponer su estigma y ser polinizadas. La fuente de variación más importante en el NG.pl^{-1} del maíz está constituida por el aborto de flores fecundadas. Los granos propensos a abortar son los más jóvenes, ubicados hacia la punta de la espiga, dado que los estigmas de los óvulos de los mismos son los últimos en emerger por lo cual su

crecimiento inicia más tarde, esto está relacionado por una competencia desfavorable por asimilados con el resto de los granos (Tollenaar & Daynard, 1978).

El PG se genera durante una sucesión de etapas a partir de la fecundación del ovario. La primera fase de llenado del grano; fase "lag", durante la cual se comienza a determinar el peso potencial del grano de maíz (Cirilo & Andrade, 1994). Luego de la fase "lag" continúa la fase de llenado efectivo, donde ocurre más del 80% del incremento de peso. Por último, el llenado del grano cesa alcanzando la madurez fisiológica y el máximo peso seco.

La tasa de llenado responde positivamente a la temperatura, aunque a elevada temperatura el acortamiento de su duración no alcanza a ser compensado por la mayor tasa y el peso final del grano quedará limitado (Thompson, 1986).

Existe una relación negativa entre el $NG.pl^{-1}$ y el peso medio de los granos a madurez fisiológica cuando se analiza un amplio rango de $NG.pl^{-1}$. El PG disminuye a medida que se aumenta el $NG.pl^{-1}$. Esta disminución se debe a una disminución en el peso de los granos de toda la espiga (Borrás & Otegui, 2001). Pese a la reducción en el peso individual del grano, el Rto en maíz aumenta al incrementarse el $NG.pl^{-1}$.

Prácticas de manejo de cultivo habituales en Argentina

Las fechas de siembra y la densidad de plantas, son dos factores de manejo del cultivo de maíz importantes que afectan los componentes del rendimiento.

La elección de la densidad de siembra es un aspecto del manejo técnico que depende del potencial ambiental de la región. El promedio nacional de densidad de siembra para maíz durante la campaña 2018/2019 fue de 62.000 plantas. ha^{-1} . Sin embargo, la densidad de siembra muestra una marcada diferencia entre planteos de maíz temprano y tardío, siendo menores las densidades utilizadas en el maíz tardío: 63.000 vs 60.300 plantas. ha^{-1} promedio en la campaña 2019/2020 (Bolsa de Cereales, 2020).

En dicha campaña, la densidad de siembra del maíz tardío varió entre 38 mil plantas. ha^{-1} (SO de Buenos Aires) y 74 mil plantas. ha^{-1} (Núcleo Sur). El gradiente de densidad de siembra que se aprecia entre regiones refleja la adaptación del manejo técnico a las condiciones ambientales de cada región productiva (Bolsa de Cereales, 2020).

La zona núcleo, por ejemplo, presenta el valor promedio más alto de densidad de siembra: 76.000 plantas. ha^{-1} , un 23% mayor al promedio nacional (Bolsa de Cereales, 2019).

Por otro lado, en los alrededores de la zona núcleo y hacia ambientes de menor potencial productivo con condiciones propensas a la sequía, la densidad de siembra adoptada por

los productores consiste en una población relativamente baja en busca de maximizar el Rto de maíz a través de una menor competencia entre plantas y, de esta manera, asegurar la disponibilidad de recursos por planta para estar por encima del umbral mínimo para la fijación de granos. Esto también favorece la disminución de algunos costos como, por ejemplo, reduce el gasto de implantación por ha, lo que resulta en una mejora en la relación económica del cultivo. Este es el caso del oeste pampeano argentino, que cuenta con ambientes propensos a la sequía (Merlos et al., 2015). Por ejemplo, en el sudoeste pampeano los productores están implementando, actualmente, una densidad de planta que oscila entre 2 y 3 pl.m⁻² dependiendo del nivel de limitaciones ambientales (Rotili et al., 2019).

A su vez, esta reducción de la densidad de siembra iría acompañada de la utilización de híbridos prolíficos. Con esto se busca realizar un manejo defensivo, minimizando los riesgos en ambientes con mucha variabilidad espacial y temporal. De este modo, se incrementa la seguridad de cosecha mediante una reducción en la densidad de siembra y, al mismo tiempo, se pretende capturar condiciones favorables mediante la plasticidad del híbrido (Ross et al., 2014).

Mecanismos de compensación

El maíz tiene una capacidad limitada para compensar una baja densidad de plantas a través de una mayor superficie de sus hojas (Cox, 1996, Doebley et al., 1997) a diferencia de especies con mayor plasticidad fenotípica (Vega & Andrade, 2000) como el girasol (expansión foliar muy variable), la soja (capacidad de ramificar) o el trigo (capacidad de macollar). En consecuencia, a bajas densidades hay una menor intercepción de la radiación del cultivo de maíz y, por lo tanto, el crecimiento es menor.

El manejo de la densidad de plantas es una de las herramientas más efectivas para obtener conopeos eficientes en la captura de radiación (Maddonni & Otegui, 1996). El cultivo de maíz es capaz de alcanzar su máxima tasa de crecimiento recién cuando el área foliar desplegada le permite capturar el 95% de la luz incidente. La cantidad de plantas necesarias para lograr esa cobertura es función del área foliar de cada planta, de la disposición de sus hojas (erectas o planas) y de la distribución espacial de las plantas sobre el terreno (Cox, 1996).

El componente del Rto más afectado por la densidad es el NG que alcanzan la madurez (Andrade et al., 1996). La forma de respuesta del cultivo refleja la escasa plasticidad reproductiva del maíz a baja densidad, donde el número máximo de flores formadas limita

el aumento del número de granos cuando la planta crece a altas tasas. Esta limitación puede ser parcialmente superada a través de la prolificidad (carácter genotípico) cuando se logra superar una determinada tasa de crecimiento por planta, y así fijar una segunda espiga que puede explicar entre un 30 y un 50% del Rto a bajas densidades (Valentinuz et al., 2007). A medida que el crecimiento por planta disminuye por incrementos en la densidad, la caída en el número de granos fijados en la planta se hace más abrupta y puede producirse esterilidad completa (Vega et al., 2001a). Ello responde al relegamiento en la asignación de asimilados dentro de la planta que sufre la espiga en su posición axilar, debido a mecanismos de dominancia apical a medida que la disponibilidad de recursos para el crecimiento se reduce (Andrade et al., 1993). En ambientes de mediana a baja productividad es conveniente optar por bajas densidades de siembra, ya que las pérdidas de rendimiento por exceso de densidad en años secos son, generalmente, mayores que el potencial de rendimiento no explotado por densidades subóptimas en los años de buena disponibilidad hídrica (Cirilo et al., 2012).

Una alta plasticidad reproductiva, interpretada como la habilidad de la planta de mantener la relación entre la disponibilidad de recursos por planta y el rendimiento por planta ($Rto.pl^{-1}$) (Vega et al., 2000), debería ser un atributo útil en estrategias de manejo de baja densidad adoptada en áreas propensas a la sequía (Cerrudo et al., 2013).

La prolificidad ha sido propuesta como un indicador de la plasticidad reproductiva del maíz, la cual se interpreta como la habilidad de fijar una segunda espiga a un nivel de disponibilidad de recursos por planta muy por debajo del necesario para maximizar el NG de la espiga superior (Sarquís et al., 1998). Los genotipos prolíficos presentan un menor valor de crecimiento mínimo por planta para fijar esa segunda espiga respecto de los no prolíficos (Otegui & Melón, 1997).

Los programas actuales de mejoramiento de maíz están enfocados principalmente en incrementar la tolerancia al estrés mediante evaluaciones de híbridos a alta densidad y por lo tanto con baja disponibilidad de recursos por planta, lo que representa una condición de estrés (Di Matteo et al., 2016). De acuerdo con esta estrategia de mejoramiento, pequeñas diferencias en el rendimiento deberían esperarse entre híbridos prolíficos y no prolíficos actuales bajo condiciones de baja disponibilidad de recursos por planta (alta densidad) (Ross et al., 2020).

La información respecto a la capacidad de compensación del rendimiento de los híbridos prolíficos y no prolíficos a bajas densidades es escasa. Este trabajo se propone generar

información respecto al desempeño de híbridos prolíficos en comparación con no prolíficos, en condiciones contrastantes de disponibilidad de recursos.

Hipótesis

Los híbridos prolíficos de maíz poseen mayor capacidad de compensación del rendimiento en bajas densidades de siembra respecto a los híbridos no prolíficos a través de un mayor número de granos.

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de compensación del rendimiento en híbridos prolíficos y no prolíficos de maíz a bajas densidades.

Objetivos específicos

- Caracterizar los híbridos por el nivel de prolificidad para constatar la información que a priori se conoce sobre ellos.
- Analizar las diferencias entre híbridos y su respuesta al ambiente mediante los componentes del rendimiento en grano.
- Estudiar las correlaciones existentes entre las variables analizadas que permitan comprender las diferencias entre híbridos (si las hubiere).

Palabras claves

Zea mays, compensación, prolificidad, rendimiento.

Materiales y métodos

Se realizó un ensayo a campo en la localidad de Pergamino en el campo experimental del Criadero de Semillas ACA (33°54'38.59"S, 60°38'31.84"O) en la campaña 2019/2020.

El ensayo se sembró bajo un diseño factorial en bloques con 3 repeticiones. Se implementaron tres densidades de siembra diferentes: como densidad alta (DA) se utilizó la densidad recomendada para la zona (8 plantas.m⁻²) y se sembraron dos densidades

inferiores a la misma, densidad media (DM) con 6 plantas.m⁻² y densidad baja (DB) con 4 plantas.m⁻². La unidad experimental consistió en 4 surcos de 5 metros de largo con un espaciamiento de 70 cm entre surcos. A cada unidad experimental se le asignó uno de cuatro híbridos pertenecientes a dos grupos de prolificidad, prolíficos (P) y no prolíficos (NP): ACA470VT3P (HY 470) y ACA481VT3P (HY 481) como P, y ACA480VT3P (HY 480) y ACA473VT3P (HY 473) como NP.

Conducción de los experimentos

El ensayo se sembró el 24 de octubre del 2019 con una sembradora experimental Baumer de 4 surcos a 70cm, con dosificador a cono, colocando 40 semillas por surco. Junto con la siembra se realizó la fertilización con 160 kg.ha⁻¹ de urea + 80 kg.ha⁻¹ de microessentials SZ, y se aplicaron pre emergentes: 1lt.ha⁻¹ de biciclopirone + 1 lt.ha⁻¹ de s-metolacoloro 96% + 0,2 lt.ha⁻¹ de lambdacialotrina 5%.

Para llegar a la densidad objetivo se realizó el raleo manual el día 15 de noviembre (V6) y el 27 del mismo mes se aplicó un post emergente: 0,1 lt.ha⁻¹ de topramezone. El resto del control de malezas se realizó de forma manual.

Se aplicó riego complementario para evitar situaciones de extremo déficit hídrico.

La cosecha se realizó en forma manual el 20 de abril del 2020 cosechando los dos surcos centrales de cada parcela y separando primeras y segundas espigas (E1 y E2 respectivamente).

Variables analizadas en el cultivo

Cuando las parcelas alcanzaron la madurez de cosecha se realizó el conteo del número de plantas. Para ello se contaron en forma manual el número de tallos presentes en los dos surcos centrales de cada parcela. Luego al momento de la cosecha se contabilizó el número de primeras y segundas espigas por separado de los dos surcos centrales de cada parcela. De esta manera, se determinó el nivel de prolificidad de cada unidad experimental mediante la relación entre el número de espigas (NE) cosechadas (E1 + E2) y el número de plantas cosechadas. Luego, discriminando entre primeras y segundas espigas se determinó el peso de la totalidad de los granos de cada parcela mediante una balanza electrónica. A partir de una muestra representativa de granos de cada parcela se determinó la humedad mediante un humidímetro. Luego se tomó una muestra representativa de 100 granos de cada espiga de cada parcela y se determinó su peso (P100). Con dicho valor se estimó el peso individual de los granos (PG).

Posteriormente se calculó el rendimiento en grano (Rto) de E1 y E2 por separado a partir del peso de grano corregido a 14,5% de humedad. Luego, para determinar el Rto de cada parcela se sumaron los Rto de E1 y E2.

Con el P100 y el Rto se calculó el número de granos por espiga ($NG.E^{-1}$) por metro cuadrado (E1 y E2 por separado). Con dicho valor y con el NE por metro cuadrado se calculó el número de granos por espiga ($NG.E^{-1}$). El NE por metro cuadrado se obtuvo mediante la relación entre espigas cosechadas en los dos surcos centrales y la superficie ($7 m^2$).

Se obtuvo el número de granos por metro cuadrado ($NG.m^{-2}$) sumando el $NG.E1^{-1}$ y el $NG.E2^{-1}$. Con este valor y con la densidad se calculó el número de granos por planta ($NG.pl^{-1}$). Luego se obtuvo el rendimiento por planta ($Rto.pl^{-1}$) a partir del $NG.pl^{-1}$ y el PG.

Por último, se estimó la capacidad de compensación del Rto como la relación entre el Rto medio de cada híbrido a DA respecto de la DB. Se aplicó la misma metodología para calcular la capacidad de compensación al pasar de la DM y la DB. Esto se repitió para $NG.m^{-2}$, PG, $Rto.pl^{-1}$ y $NG.pl^{-1}$.

Análisis estadísticos

Se verificaron los supuestos de normalidad, con gráficos de Quantile–Quantile Plot (Q-Q plot), y de homogeneidad de varianzas (homocedasticidad), con diagramas de dispersión de residuos vs predichos.

Los datos se analizaron estadísticamente mediante el Análisis de la varianza (ANOVA) con el modelo estadístico que se detalla a continuación:

Modelo estadístico utilizado:

$$Y_{ijk} = \mu + HY_i + D_j + (HYD)_{ij} + Rep_k + e_{ijk}$$

Dónde:

Y_{ijk} es el valor de la respuesta para el híbrido i , en la densidad j , y la repetición k .

μ es la media general.

HY_i es el efecto del híbrido i .

D_j es el efecto de la densidad j .

$(HYD)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el híbrido i y la densidad j .

Rep_k es el efecto de la repetición k .

e_{ijk} es el error aleatorio correspondiente a la interacción entre el híbrido i , la densidad j y la repetición k .

Con $i = 1, 2, 3, 4$; $j = 1, 2, 3$; y $k = 1, 2, 3$.

Las diferencias entre las medias se analizaron mediante el test de LSD Fisher al 5%.

Para corroborar el agrupamiento de los híbridos como prolíficos y no prolíficos se utilizó la variable *grupos de prolificidad* y se analizaron las diferencias entre los mismos mediante contrastes.

También se realizaron análisis de correlaciones (Pearson) para observar cuáles de las variables explican el rendimiento y qué relación existe entre ellas.

Para el análisis estadístico y procesamiento de datos se utilizó el paquete estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al, 2017).

Resultados

Supuestos

Se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (Anexos) para todas las variables analizadas.

Caracterización de los híbridos por prolificidad

Los híbridos fueron agrupados en prolíficos y no prolíficos y, para los análisis, se usaron las diferencias entre ambos grupos. El agrupamiento por prolificidad fue realizado considerando la información proporcionada por los mejoradores, la cual fue confirmada mediante la evaluación del número de espigas por planta a la densidad de 4 pl.m⁻² ($p < 0,001$) (Tabla 1).

Tabla 1. Dos grupos de prolificidad (P y NP) de los cuatro híbridos evaluados y la prolificidad como el número de espigas por planta (NE.pl⁻¹) en densidad de 4 pl.m⁻².

Densidad	Grupo	Prolificidad	
pl.m ⁻²		NE.pl ⁻¹	
4	P	1,67	a
	NP	1,13	b

Las medias seguidas por una misma letra en una columna no son significativamente diferentes: $p > 0,05$.

En las siguientes tablas (Tabla 2 y Tabla 3) se presentan las medias obtenidas con los ANOVA para las diferentes variables que componen al rendimiento, separando entre grupos de prolificidad, y su variación a través de las diferentes densidades de siembra utilizadas.

Tabla 2. ANOVA y medias fenotípicas agrupadas por densidad (4, 6 y 8 pl.m⁻²), grupos de prolificidad (P y NP) e híbridos (HY) para las variables rendimiento (Rto), número de granos por metro cuadrado (NG.m⁻²), número de granos por espiga 1 (NG.E1⁻¹), número de granos por espiga 2 (NG.E2⁻¹), peso de grano (PG), prolificidad (NE.pl⁻¹), número de granos por planta (NG.pl⁻¹) y rendimiento por planta (Rto.pl⁻¹).

Densidad pl.m ⁻²	Grupo	Híbrido	Rto kg.ha ⁻¹	NG.m ⁻²	NG.E1 ⁻¹	NG.E2 ⁻¹
4	P	470	6463	2961	559	238
		481	6934	2348	515	177
	NP	473	6239	1858	444	187
		480	7258	1904	471	56
6	P	470	8662	3127	477	201
		481	9354	3111	469	208
	NP	473	9895	2935	475	58
		480	10127	2819	477	0
8	P	470	9792	3475	448	145
		481	10909	3529	419	165
	NP	473	8651	2565	352	21
		480	10579	3094	399	0
4			6724	2268	497	165
6			9556	2991	474	114
8			9983	3166	405	83
	P		8687	3090	481	188
	NP		8727	2505	434	53
		470	8261	3195	497	194
		481	9066	2996	468	183
		473	8058	2392	418	93
		480	9321	2606	449	19
	HY		**	***	*	***
	D		***	***	***	ns
	D*HY		ns	ns	ns	ns
	Contraste (PROLIF)		ns	***	**	***

* Significativo con $p < 0,05$. ** Significativo con $p < 0,01$. *** Significativo con $p < 0,001$. ns: no significativo.

Las medias seguidas por una misma letra en una columna no son significativamente diferentes: $p > 0,05$.

Continuación tabla 2.

Densidad pl.m ⁻²	Grupo	Híbrido	PG		Prolificidad		NG.pl ⁻¹	Rto.pl ⁻¹	
			mg		NE.pl ⁻¹			g.pl ⁻¹	
4	P	470	219	f	1,76	a	797	174	
		481	301	de	1,50	b	691	204	
	NP	473	337	bc	1,16	cde	632	212	
		480	383	a	1,11	cde	527	201	
6	P	470	278	e	1,26	cd	677	188	
		481	301	de	1,28	c	677	203	
	NP	473	337	bc	1,13	cde	533	180	
		480	359	ab	1,00	e	477	172	
8	P	470	283	e	1,07	de	593	166	
		481	310	cd	1,03	de	584	179	
	NP	473	338	b	0,97	e	373	126	
		480	342	b	0,98	e	399	136	
4			310		1,38		662	198	
6			321		1,16		588	186	
8			318		1,01		487	152	
	P		282		1,32		670	186	
	NP		350		1,05		488	170	
		470	258		1,38		691	174	
		481	304		1,27		651	196	
		473	337		1,08		510	172	
		480	361		1,03		468	170	
	HY		***		***		***	ns	
	D		ns		***		**	**	
	D*HY		***		**		ns	ns	
	Contraste (PROLIF)		***		***		***	ns	

* Significativo con $p < 0,05$. ** Significativo con $p < 0,01$. *** Significativo con $p < 0,001$. ns: no significativo.

Las medias seguidas por una misma letra en una columna no son significativamente diferentes: $p > 0,05$. Solo se indicaron las diferencias de medias para aquellas variables cuya interacción fue significativa.

Tabla 3. Comparación de las variables en estudio entre grupos de prolificidad (P y NP) para las tres densidades de siembra (8, 6 y 4 pl.m⁻²).

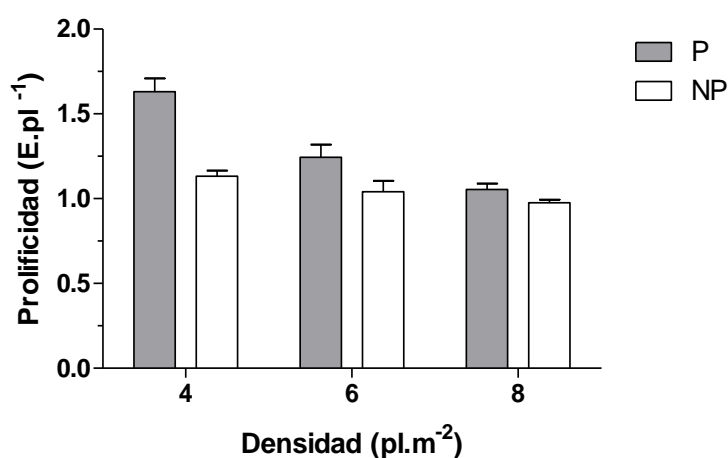
Variables	Grupo	Densidad					
		8 pl.m ⁻²		6 pl.m ⁻²		4 pl.m ⁻²	
Rto (kg.ha ⁻¹)	P	10351	a	9077	a	6698	a
	NP	9615	a	10034	a	6749	a
		ns		ns		ns	
NG.m ⁻²	P	3502	a	3117	a	2654	a
	NP	2830	b	2865	a	1881	b
		**		ns		***	
NG.E1 ⁻¹	P	434	a	472	a	537	a
	NP	376	b	476	a	458	b
		*		ns		**	
NG.E2 ⁻¹	P	155	a	205	a	207	a
	NP	10	b	23	b	122	a
		**		**		ns	
PG (mg)	P	296	b	292	b	260	b
	NP	340	a	350	a	360	a
		***		***		***	
Prolificidad (NE.pl ⁻¹)	P	1,05	a	1,27	a	1,63	a
	NP	0,98	a	1,05	b	1,13	b
		ns		*		***	
NG.pl ⁻¹	P	589	a	677	a	744	a
	NP	386	b	500	b	579	b
		**		*		*	
Rto.pl ⁻¹ (g.pl ⁻¹)	P	172	a	197	a	189	a
	NP	131	b	175	a	206	a
		*		ns		ns	

* Significativo con $p < 0,05$. ** Significativo con $p < 0,01$. *** Significativo con $p < 0,001$. ns: no significativo. Para cada variable, las medias seguidas por una misma letra en una columna no son significativamente diferentes: $p > 0,05$.

Prolificidad

La prolificidad (NE.pl^{-1}) presentó interacción $\text{HY} \times \text{D}$ ($p < 0,01$). En los P el mayor nivel de prolificidad se observó en la DB con el HY 470 (1,76), disminuyendo a medida que aumentaba la densidad hasta un valor de 1,03 correspondiente al HY 481 en la DB. En cuanto a los NP el mayor nivel de prolificidad también se obtuvo en DB con el HY 473 (1,16) disminuyendo levemente al aumentar la densidad hasta un valor de 0,97 correspondiente al HY 473 en la DB (Tabla 2) (Figura 1).

Figura 1. Prolificidad (NE.pl^{-1}) para los dos grupos de prolificidad en las tres densidades de siembra (4, 6 y 8 pl.m^{-2}).



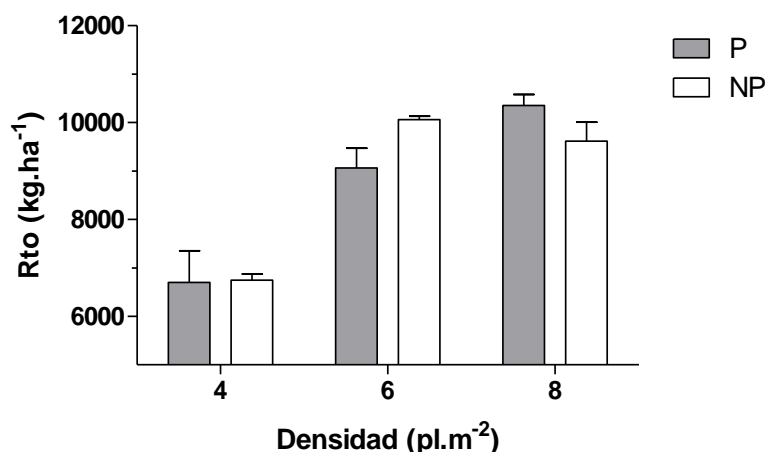
Rendimiento (Rto)

No se obtuvieron diferencias significativas entre grupos de prolificidad en Rto ($p = 0,9217$) (Tabla 2).

Hubo diferencias significativas en el Rto entre D ($p < 0,001$), obteniéndose el valor más alto, 9983 kg.ha^{-1} promedio en la DA, disminuyendo hasta 6724 kg.ha^{-1} en la DB. También hubo diferencias significativas en Rto entre HY ($p < 0,01$), lográndose el Rto más alto con el HY 480 (9321 kg.ha^{-1}) y el menor con el HY 473 (8058 kg.ha^{-1}) (Tabla 2).

Al discriminar por densidades tampoco se observaron diferencias significativas entre grupos de prolificidad en ninguna de las tres densidades ($p = 0,9094$; $p = 0,0542$ y $p = 0,1090$ para DB, DM y DA, respectivamente) (Tabla 3).

Figura 2. Rendimiento (Rto) para los dos grupos de prolificidad (P y NP) en las tres densidades de siembra (4, 6 y 8 pl.m⁻²).

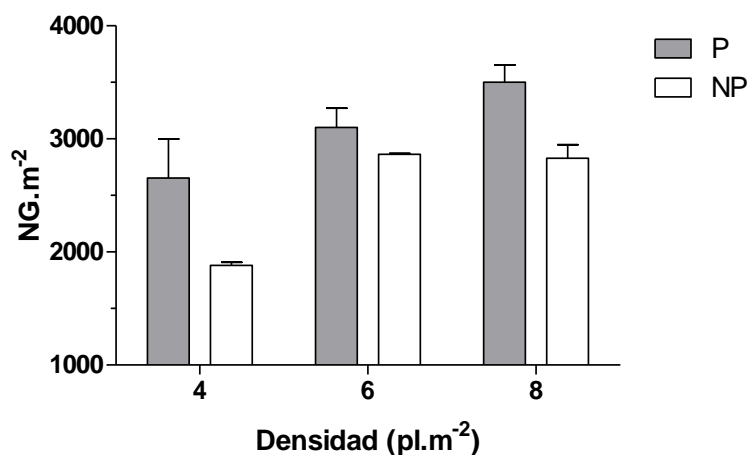


Número de granos por metro cuadrado (NG.m⁻²)

El NG.m⁻² presento diferencias significativas ($p < 0,001$) entre grupos de prolificidad siendo superior en los P que en los NP (3090 granos vs 2505 granos, respectivamente) (Tabla 2) (Figura 3). También se observaron diferencias significativas entre D ($p < 0,001$), lográndose el valor más alto de 3166 granos.m⁻² promedio en la DA, disminuyendo hasta 2268 granos.m⁻² en la DB (Tabla 2).

Al comparar los grupos de prolificidad entre densidades se observó que los P superaron a los NP tanto den DA como en DB ($p < 0,01$ y $p < 0,001$, respectivamente) (Tabla 3).

Figura 3. Número de granos por metro cuadrado (NG.m⁻²) para los dos grupos de prolificidad (P y NP) en las tres densidades de siembra (4, 6 y 8 pl.m⁻²).



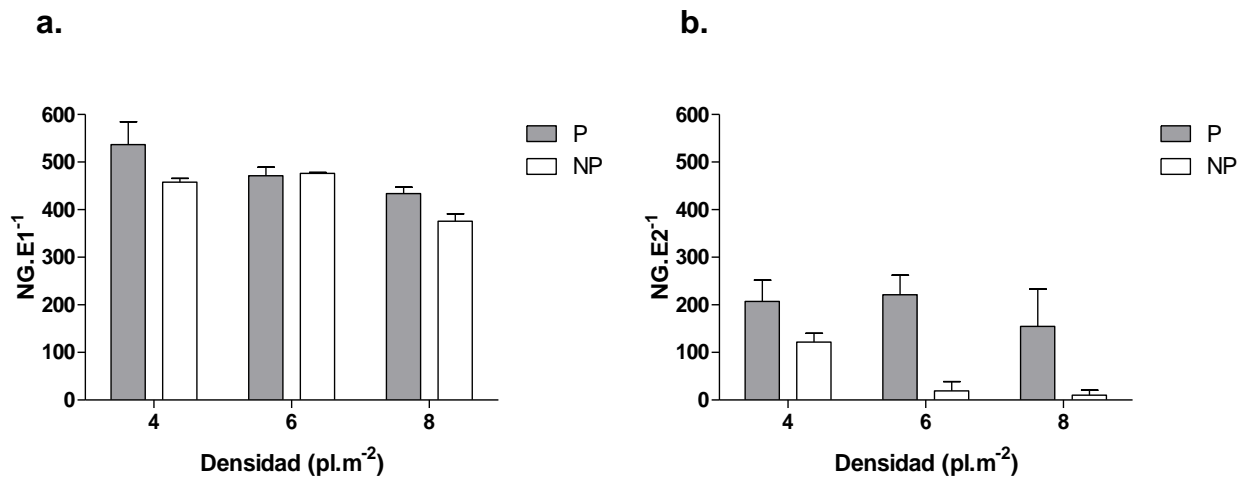
Número de granos por espiga (NG.E⁻¹)

Se observaron diferencias significativas en el NG.E⁻¹ tanto en E1 como E2 entre grupos de prolificidad ($p < 0,01$ y $p < 0,001$ respectivamente), siendo mayor en el grupo P, obteniéndose valores de 481 granos para E1 y 188 granos para E2 vs el grupo NP que logró 434 y 53 granos para E1 y E2 respectivamente (Tabla 2).

Por otro lado, hubo diferencias significativas entre D únicamente para E1 ($p < 0,001$), disminuyendo de 497 granos en DB hasta 405 granos en DA (Tabla 2) (Figura 4).

Al comparar los grupos de prolificidad entre D se observó que los P superaron a los NP en la DA tanto en E1 como en E2 ($p < 0,05$ y $p < 0,01$, respectivamente). Mientras que en la DB los P superaron a los NP únicamente en los NG.E1⁻¹ ($p < 0,01$) (Tabla 3).

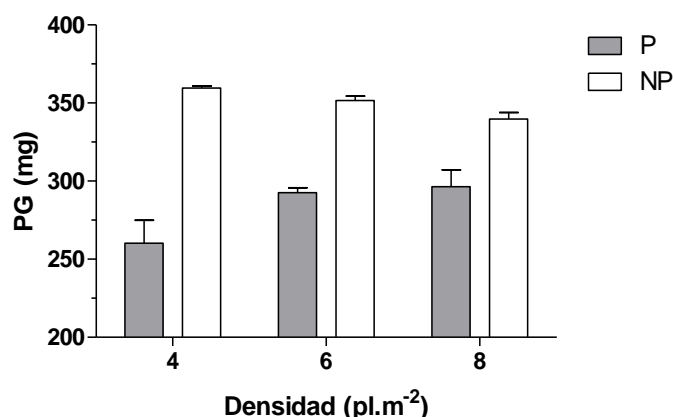
Figura 4. Número de granos por espiga (NG.E⁻¹) para los dos grupos de prolificidad en las tres densidades de siembra (4, 6 y 8 pl.m⁻²) para (a) espiga 1 y (b) espiga 2.



Peso de granos (PG)

El PG presento interacción HY*D ($p < 0,001$). En los híbridos NP el PG se mantuvo constante entre densidades, mientras que en los híbridos P se observó una reducción del PG al disminuir la densidad (Tabla 2) (Figura 5).

Figura 5. Peso de grano (PG) para los dos grupos de prolificidad (P y NP) en las tres densidades de siembra (4, 6 y 8 pl.m⁻²).



Numero de granos y rendimiento por planta (NG.pl⁻¹ y Rto.pl⁻¹)

Existieron diferencias significativas en NG.pl⁻¹ entre D ($p < 0,01$), obteniendo un mayor NG en la DB que en la DA (662 vs 486 granos respectivamente). A su vez, existieron diferencias significativas entre grupos de prolificidad ($p < 0,001$), teniendo mayor NG.pl⁻¹ los híbridos pertenecientes al grupo P (670 P vs 488 NP) (Tabla 2). Esta relación entre grupos de prolificidad se mantuvo a través de las tres D, siempre superando los P a los NP (Tabla 3).

En cuanto al Rto.pl⁻¹ se obtuvieron diferencias significativas entre D ($p < 0,01$), logrando mayor Rto.pl⁻¹ en la DB que en la DA (198 vs 152 respectivamente) (Tabla 2).

Al comparar los grupos de prolificidad entre densidades (Tabla 3) se observó que los P superaron a los NP únicamente en la DA ($p < 0,05$).

Capacidad de compensación

Capacidad de compensación del rendimiento (Rto)

Se pudo observar que la capacidad de compensación del Rto al pasar de DA a DB no presentó diferencias significativas entre grupos de prolificidad P y NP ($p = 0,4560$), disminuyendo un 35% y 30% respectivamente. Por otra parte, tampoco se observaron diferencias significativas entre grupos de prolificidad P y NP en la capacidad de compensación del Rto entre DM y DB, disminuyendo un 26% y 33% respectivamente ($p = 0,1238$) (Tabla 4).

Capacidad de compensación a partir de los principales componentes numéricos (NG.m⁻² y PG)

Se pudo observar que la capacidad de compensación a partir del NG.m⁻², al pasar de DA a DB, no presento diferencias significativas entre los grupos de prolificidad P y NP ($p = 0,4318$), disminuyendo un 24% y 34% respectivamente. A su vez, tampoco se observaron diferencias en dicha característica entre grupos P y NP al pasar de DM a DB ($p = 0,0703$) (Tabla 4).

La capacidad de compensación a partir del PG presento diferencias significativas ($p < 0,05$) entre P y NP, de manera que en los P disminuyo en un 12% al pasar de DA a DB, mientras que en los NP aumento en un 6%. Sin embargo, cuando se observó la variación de DM a DB no se presentaron diferencias significativas ($p = 0,0596$), los P disminuyeron el PG en un 11%, mientras que los NP aumentaron en un 3% (Tabla 4).

Capacidad de compensación a partir del rendimiento por planta (Rto.pl⁻¹) y número de granos por planta (NG.pl⁻¹).

La capacidad de compensación del Rto por planta pasando de DA a DB no presentó diferencias significativas entre grupos de prolificidad ($p = 0,0615$), aumentando un 10% y 57% respectivamente (Tabla 4). Al pasar de DM a DB tampoco se presentaron diferencias significativas entre P y NP ($p = 0,4160$), observándose una variación de -4 y 18% respectivamente. Lo mismo ocurrió con el NG.pl⁻¹, no habiendo diferencias significativas entre grupos de prolificidad al pasar de DA a DB y de DM a DB ($p = 0,3947$ y $p = 0,8832$, respectivamente).

Tabla 4. Variación (%) al pasar de densidad alta (8 pl.m⁻²) y media (6 pl.m⁻²) a densidad baja (4 pl.m⁻²) para las principales variables en estudio.

Variables	Grupo	Densidad			Variación (%)	
		8 pl.m ⁻²	6 pl.m ⁻²	4 pl.m ⁻²	8 a 4 pl.m ⁻²	6 a 4 pl.m ⁻²
Rto (kg.ha ⁻¹)	P	10351	9077	6698	-35% a	-26% a
	NP	9615	10034	6749	-30% a	-33% a
NG.m ⁻²	P	3502	3117	2654	-24% a	-15% a
	NP	2830	2865	1881	-34% a	-34% a
PG (mg)	P	296	292	260	-12% b	-11% a
	NP	340	350	360	6% a	3% a
NG.pl ⁻¹	P	589	677	744	26% a	10% a
	NP	386	500	579	50% a	16% a
Rto.pl ⁻¹ (g.pl ⁻¹)	P	172	197	189	10% a	-4% a
	NP	131	175	206	57% a	18% a

Para cada variable, las medias seguidas por una misma letra en una columna no son significativamente diferentes: $p > 0,05$. +: aumenta. -: disminuye.

Correlaciones (Tabla 5)

El NG.m⁻² en la DB tuvo una correlación positiva y fuerte con el NG.E⁻¹ (0,90), pero dicha correlación fue mayor en la E1 (0,95 y $p < 0,001$) que en la E2 (0,69 y $p < 0,05$). También se correlacionó positivamente con el NE.pl⁻¹ y NG.pl⁻¹ (0,82 y 0,90 respectivamente). Por otro lado, el NG.m⁻² y el PG se correlacionaron de manera negativa (-0,81). Al pasar a la DA, las variables mencionadas presentaron las mismas correlaciones (NG.m⁻² vs NG.E⁻¹, NG.E1⁻¹, NG.E2⁻¹, NE.pl⁻¹, NG.pl⁻¹). Sumado a esto, en la DA se observó una correlación positiva entre el NG.m⁻² y el Rto.pl⁻¹ (0,83 y $p < 0,001$).

El NG.E1⁻¹ en la DB presentó una correlación negativa con el PG (-0,63 y $p < 0,05$). Sin embargo, dicha variable presentó una correlación positiva con el NE.pl⁻¹ (0,71 y $p < 0,01$), con el NG.pl⁻¹ (0,85 y $p < 0,001$) y con el NG.E⁻¹ (0,85 y $p < 0,001$). En la DA el NG.E1⁻¹ presentó una correlación negativa con el PG (-0,71 y $p < 0,05$). Por otro lado, dicha variable presentó una correlación positiva con el NG.pl⁻¹ (0,77 y $p < 0,01$), con el NG.E⁻¹ (0,77 y $p < 0,01$) y con el Rto.pl⁻¹ (0,74 y $p < 0,01$), en la DA.

El NG.E2⁻¹ en la DB presentó una correlación negativa con el PG (-0,73 y $p < 0,01$). Sin embargo, dicha variable presentó una correlación positiva con el NG.pl⁻¹ (0,92 y $p < 0,001$)

y con el NG.E⁻¹ (0,92 y p < 0,001).). En la DA el NG.E2⁻¹ presentó una correlación negativa con el PG (-0,82 y p < 0,01). No obstante, dicha variable presento una correlación positiva con el NE.pl⁻¹ (0,69 y p < 0,05), con el NG.pl⁻¹ (0,96 y p < 0,001), con el NG.E⁻¹ (0,96 y p < 0,001) y con el Rto.pl⁻¹ (0,94 y p < 0,001).

En DB el PG se correlacionó negativamente con el NE.pl⁻¹, NG.pl⁻¹ y NG.E⁻¹ (-0,90; -0,77 y -0,77 respectivamente con p < 0,001), lo que indica que al disminuir alguna de dichas variables el PG aumenta (y viceversa). Al pasar a la DA dichas correlaciones con el PG se mantienen (con valores de -0,79; -0,87 y -0,87) y, además, se observó correlación negativa entre PG y Rto.pl⁻¹ (-0,73).

El NE.pl⁻¹ presentó, a su vez, correlación positiva con el NG.pl⁻¹ y el NG.E⁻¹ tanto en DB (0,66 y p < 0,05 para ambas variables) como DA (0,72 y p < 0,01 para ambas variables). En DA, además, se observó correlación positiva entre NE.pl⁻¹ y Rto.pl⁻¹ (0,63 y p < 0,05).

El NG.pl⁻¹ presentó una correlación muy fuerte con el NG.E⁻¹ tanto en DB como DA (1,00 en ambos casos con p < 0,001). También, en la DA el NG.E⁻¹ tuvo una correlación positiva y fuerte con el Rto.pl⁻¹ (0,97 y p < 0,001).

Por otra parte, el Rto no presento correlación con la prolificidad en ninguna de las densidades (Tabla 5) (Figura 6).

Tabla 5. Correlaciones entre las variables en estudio para las tres densidades de siembra (4, 6 y 8 pl.m⁻²)

		4 pl.m ⁻²							
	Rto	NG.m ⁻²	NG.E1 ⁻¹	NG.E2 ⁻¹	PG	NE.pl ⁻¹	NG.pl ⁻¹	NG.E ⁻¹	Rto.pl ⁻¹
Rto		0,50	0,71 *	0,15	0,07	0,10	0,44	0,44	0,69 *
NG.m ⁻²			0,95 ***	0,69 *	-0,81 **	0,82 **	0,90 ***	0,90 ***	0,17
NG.E1 ⁻¹				0,57	-0,63 *	0,71 **	0,85 ***	0,85 ***	0,34
NG.E2 ⁻¹					-0,73 **	0,49	0,92 ***	0,92 ***	0,44
PG						-0,90 ***	-0,77 ***	-0,77 ***	0,20
NE.pl ⁻¹							0,66 *	0,66 *	-0,25
NG.pl ⁻¹								1,00 ***	0,45
NG.E ⁻¹									0,45

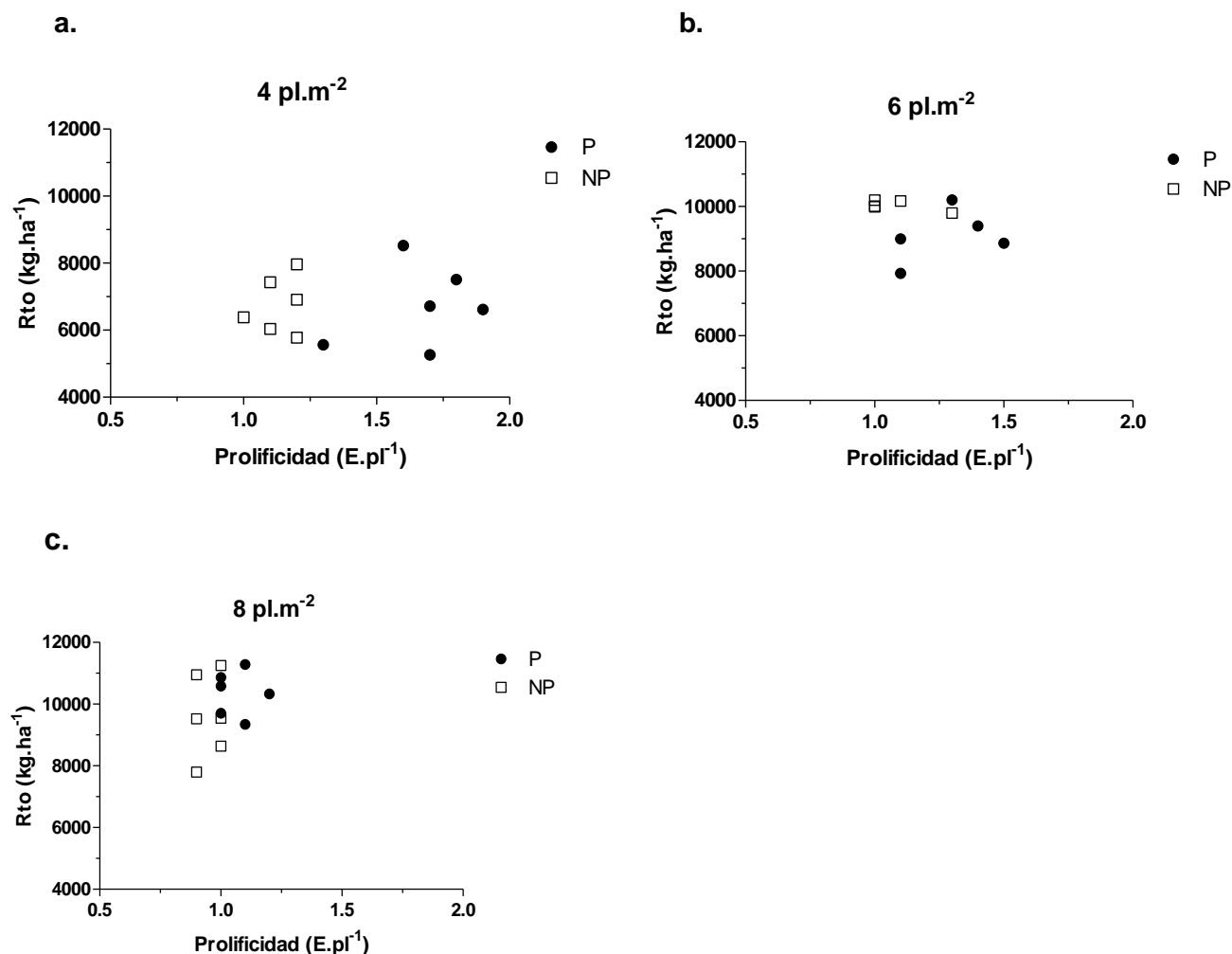
* Significativo con p < 0,05. ** Significativo con p < 0,01. *** Significativo con p < 0,001.

Continuación tabla 5.

6 pl.m⁻²									
	Rto	NG.m ⁻²	NG.E1 ⁻¹	NG.E2 ⁻¹	PG	NE.pl ⁻¹	NG.pl ⁻¹	NG.E ⁻¹	Rto.pl ⁻¹
Rto		0,13	0,59	-0,65 *	0,69 *	-0,24	-0,52	-0,52	-0,25
NG.m ⁻²			0,55	0,50	-0,63 *	0,59	0,61	0,61	0,40
NG.E1 ⁻¹				-0,06	0,05	-0,19	0,14	0,14	0,25
NG.E2 ⁻¹					-0,88 ***	0,50	0,98 ***	0,98 ***	0,83 **
PG						-0,62	-0,86 **	-0,86 **	-0,51
NE.pl ⁻¹							0,45	0,45	0,21
NG.pl ⁻¹								1,00 ***	0,88 ***
NG.E ⁻¹									0,88 ***
8 pl.m⁻²									
	Rto	NG.m ⁻²	NG.E1 ⁻¹	NG.E2 ⁻¹	PG	NE. pl ⁻¹	NG.pl ⁻¹	NG.E ⁻¹	Rto.pl ⁻¹
Rto		0,78 **	0,60 *	0,30	-0,15	0,28	0,41	0,41	0,52
NG.m ⁻²			0,84 ***	0,70 **	-0,73 **	0,69 *	0,83 ***	0,83 ***	0,83 ***
NG.E1 ⁻¹				0,60	-0,71 *	0,56	0,77 **	0,77 **	0,74 **
NG.E2 ⁻¹					-0,82 **	0,69 *	0,96 ***	0,96 ***	0,94 ***
PG						-0,79 **	-0,87 ***	-0,87 ***	-0,73 **
NE.pl ⁻¹							0,72 **	0,72 **	0,63 *
NG.pl ⁻¹								1,00 ***	0,97 ***
NG.E ⁻¹									0,97 ***

* Significativo con $p < 0,05$. ** Significativo con $p < 0,01$. *** Significativo con $p < 0,001$.

Figura 6. Rendimiento (Rto) vs prolificidad (NE.pl⁻¹) para (a) 4 pl.m⁻², (b) 6 pl.m⁻² y (c) 8 pl.m⁻², donde los círculos representan a los prolíficos (P) y los cuadrados a los no prolíficos (NP).



Discusión

En el presente trabajo se pudo comprobar que NE.pl⁻¹ no se modificó en los híbridos NP al variar la densidad de siembra, aunque se observó una ligera tendencia a la baja al aumentar la densidad. Por otro lado, en los híbridos P, dicha variable disminuyó al pasar de DB a DM y DA, es decir, al pasar a una densidad en donde los recursos por planta se vuelven más limitantes. Ciancio et al. (2016) llegaron a las mismas conclusiones, logrando mayor NE.pl⁻¹ en los P en densidad baja (4 pl.m⁻²) que en alta (8 pl.m⁻²). Esto se debe a que los híbridos prolíficos presentan un menor valor de crecimiento mínimo por planta para fijar una segunda espiga respecto de los no prolíficos (Otegui & Melón, 1997). A su vez, la diferencia en el NE.pl⁻¹ entre grupos de prolificidad fue mayor en la DB, reduciéndose al aumentar la densidad hasta no presentar diferencias en la DA.

El rendimiento del cultivo se vio modificado según la densidad, de manera que, en la DB, tanto los híbridos P como los NP presentaron el rendimiento más bajo y, al aumentar la densidad de siembra, el rendimiento aumentó, logrando los mayores valores en la DA. Esto se debe a que el maíz tiene una capacidad limitada para compensar una baja densidad de plantas a través de una mayor superficie de sus hojas y, como consecuencia, a bajas densidades hay una menor intercepción de la radiación por parte del cultivo (no se llega el IAF crítico) lo que lleva a un menor crecimiento y termina repercutiendo en el rendimiento (Cox, 1996, Doebley et al., 1997). Por otro lado, los mayores rendimientos obtenidos en la DA indicarían que no se llegaron a explorar densidades supraóptimas, ya que a dichas densidades se esperaría una disminución del rendimiento, debido a la dominancia hormonal que ejerce la panoja sobre la espiga axilar lo que determina que al disminuir los recursos por planta durante el periodo crítico de determinación del rendimiento, aumente la tasa de abortos de granos y espigas, con un aumento del número de plantas estériles y una reducción del número de granos (Satorre, 2014).

El NG que alcanza el cultivo a la madurez es el componente del rendimiento más afectado por la densidad (Andrade et al., 1996), por lo que, el menor rendimiento obtenido en la DB se explica por el menor NG.m^{-2} logrado respecto a la DM y DA. También se pudo ver que los híbridos P tuvieron mayor NG.m^{-2} que los NP tanto en DA como en DB.

El Rto.pl^{-1} presentó un comportamiento opuesto al rendimiento del cultivo, de manera que en la DB obtuvo el mayor valor, disminuyendo al aumentar la densidad. Esto se debe a que, en la DB la tasa de crecimiento por planta es mayor, resultando en la fijación de segundas espigas, de mayor tamaño (mayor NG) y, por lo tanto, con mayor contribución al rendimiento (Otegui, 1995).

Al analizar el NG.E^{-1} , se observó que el NG de la E1 fue menor, para todos los híbridos, en la DA que en la DB, superando, en ambas densidades, los híbridos P a los NP. Mientras que, el NG de la E2, presentó un comportamiento distinto entre grupos de prolificidad. Para los híbridos P, el NG.E2^{-1} no se vio afectado al modificarse la densidad de siembra, pero para los NP el NG de la E2 fue mayor en la DB y se redujo drásticamente al aumentar la densidad, por lo que el NG de la E1 es quien determina principalmente el rendimiento por unidad de superficie. Ciancio et al. (2016) también observaron diferencias en el NG.E^{-1} entre densidades, pero a diferencia de este ensayo, ellos obtuvieron mayor NG en ambas espigas al disminuir la densidad de siembra.

Respecto al PG, no se obtuvieron diferencias entre densidades de siembra, lo que concuerda con lo expuesto por Andrade y Sadras (2000) quienes observaron que el PG era

el componente del rendimiento que presentaba mayor estabilidad al modificarse la densidad. Sin embargo, se obtuvieron diferencias entre genotipos, los NP tuvieron mayor peso que los P en las tres densidades, y se observó, también, interacción HY*D. En los híbridos P el PG disminuyó al reducirse la densidad de siembra, mientras que en los híbridos NP el peso se mantuvo constante.

Entonces, si bien se observó un mayor $NG.E^{-1}$ y mayor $NG.m^{-2}$ en los híbridos P que en los NP en las tres densidades, salvo en la densidad media para el $NG.m^{-2}$, esta diferencia no se vio reflejada en un mayor rendimiento por parte de los P ya que, los híbridos NP compensaron este menor NG con un mayor peso de los mismos.

En cuanto a la capacidad de compensación del rendimiento no se obtuvieron diferencias entre grupos de prolificidad, disminuyendo los híbridos P un 35% y los NP un 30% al pasar de DA a DB, es decir, a una densidad con mayor disponibilidad de recursos por planta. Sin embargo, Ross et al. (2020) llegaron a otros resultados, dado que, si bien utilizaron densidades menores, los híbridos P lograron mantener el rendimiento cuando se redujo la densidad de siembra de 4 a 2 $pl.m^{-2}$, mientras que en los NP se redujo en más de un 25%.

Tampoco se obtuvieron diferencias entre los híbridos P y NP en la capacidad de compensación a través del $NG.m^{-2}$, disminuyendo un 24 y 34% respectivamente al pasar de DA a DB. Esto difiere con lo observado por Ross et al. (2020) en donde, si bien utilizaron densidades inferiores, al pasar de 4 a 2 $pl.m^{-2}$ no se afectó el $NG.m^{-2}$ en los híbridos P debido a que el incremento en el $NG.pl^{-1}$ compensó completamente la reducción de plantas por unidad de área, mientras que en el caso de los NP el $NG.m^{-2}$ se redujo en un 31,5%.

Ross et al. (2020) también observaron que en los P el $Rto.pl^{-1}$ logró compensar la disminución de la densidad de siembra, logrando mantener estable el rendimiento. Sin embargo, en las densidades exploradas en este ensayo no se obtuvieron diferencias en la capacidad de compensación del $Rto.pl^{-1}$ entre grupos de prolificidad a pesar de que los NP aumentaron un 57% y los P un 10% al pasar de DA a DB. Por otro lado, lo que se pudo ver es que el $Rto.pl^{-1}$ de los P superó a los NP, pero únicamente en la DA, lo que coincide, parcialmente, con lo reportado por Sarquís et al. (1998), quienes obtuvieron mayor $Rto.pl^{-1}$ por parte de los P no solo en densidades altas sino también en densidades bajas.

Ross et al. (2020) también observaron que cuando la disponibilidad de recursos por planta aumentó el doble por reducción en la densidad de plantas de 4 a 2 $pl.m^{-2}$, el $NG.pl^{-1}$ aumento el doble (100%) en los híbridos P, pero incrementó solo un 36% en los híbridos NP. Esto difiere con los resultados obtenidos en este trabajo, en donde, si bien se utilizaron

densidades superiores, al aumentar al doble la disponibilidad de recursos por planta por reducción en la densidad de plantas de 8 a 4 pl.m⁻², el NG.pl⁻¹ aumento solo un 26% en los prolíficos, mientras que en los NP aumentó en un 50%.

Por otro lado, los grupos de prolificidad presentaron diferencias en la capacidad de compensación a partir del PG, logrando los NP mantener, incluso aumentar levemente (6%), el PG al disminuir la densidad de siembra de 8 a 4 pl.m⁻², mientras que en los P se redujo un 12%. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Ross et al. (2020), en donde la mayor disminución en el NG de los NP fue parcialmente compensada por un incremento en el PG (+7%).

El rendimiento a DB se correlacionó positivamente con el NG.E1⁻¹, sin mostrar correlación con la prolificidad del híbrido, como sí ocurrió en los resultados obtenidos por Ross et al. (2020). Aunque, si bien la prolificidad NE.pl⁻¹ no estuvo directamente correlacionada con el rendimiento, si presentó una correlación positiva con el NG.m⁻², NG.pl⁻¹ y NG.E⁻¹, tanto en la densidad alta como en la baja. En el caso de la DA, el rendimiento no solo estuvo positivamente correlacionado con el NG.E1⁻¹, sino que también presentó una fuerte correlación con el NG.m⁻². Por otro lado, en ninguna de las tres densidades el rendimiento estuvo correlacionado con el NE.pl⁻¹, de manera que, si bien los híbridos P presentaron un mayor nivel de prolificidad, sobre todo en la DB, dicho factor no influyo de manera significativa en el rendimiento. Esto difiere con estudios previos los cuales indican que los híbridos P presentan una mejor performance bajo densidades subóptimas (Ross et al, 2014).

Por otro lado, el PG se correlacionó negativamente con casi todas las variables analizadas en las tres densidades (NG.m⁻², NG.E1 y E2, NE.pl⁻¹, NG.pl⁻¹, NG.E⁻¹ y Rto.pl⁻¹). De manera opuesta, el NG.m⁻², por su parte, estuvo positivamente correlacionado con dichas variables, tanto en las densidades altas como bajas. De acuerdo con esto, ambas variables (PG y NG.m⁻²) estuvieron negativamente relacionadas entre sí en las tres densidades, de manera que cualquier factor que genere un incremento en el valor de alguno de estos dos factores (en este caso la variación de los recursos por planta) va a generar una disminución en el otro y en sus componentes relacionados (como los previamente mencionados).

Conclusiones

No se presentaron diferencias en el rendimiento entre grupos de prolificidad al aumentar la disponibilidad de recursos por planta, mostrando, ambos grupos, una reducción del rendimiento en igual proporción al disminuir la densidad de siembra. Sin embargo, los híbridos difirieron en su capacidad de compensación. Los híbridos prolíficos aumentaron el número de granos, en tanto que los no prolíficos aumentaron el peso de los mismos.

Por lo tanto, bajo estrategias de manejo de baja densidad, y de acuerdo a las densidades utilizadas en este trabajo, no se puede aseverar que optar por híbridos prolíficos sea la mejor opción debido a que los resultados obtenidos muestran que no hay diferencia entre grupos de prolificidad y que, por lo tanto, la mejor opción podría estar ligada a diferentes características asociadas al genotipo del híbrido más que a la prolificidad en sí. Sin embargo, los resultados obtenidos están limitados a las densidades y a los genotipos explorados en este ensayo.

Bibliografía

- Andrade, F. H., Uhart, S. A. & Furgone, M. I. (1993). Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade versus plant density effects. *Crop Science*, 33: 482-485.
- Andrade, F. H. (1995). Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*, 41: 1-12.
- Andrade, F. H., Cirilo, A. G., Uhart, S. A. & Otegui, M. E. (1996). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Buenos Aires: Editorial La Barrosa. EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press.
- Andrade, F. H., Vega, C. R., Uhart, S. A., Cirilo, A. G., Cantarero, M. & Valentinuz, O. (1999). Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39: 453-459.
- Andrade, F. H. & Sadras, V. O. (2000). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Argentina: Editorial Médica Panamericana, 3: 68-70, 4: 107-118.
- Bolsa de Cereales. (2019). Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. CABA, Argentina. 6 pp. Informe mensual N° 24.
- Bolsa de Cereales. (2020). Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada: Maíz Tardío. CABA, Argentina. 7 pp. Informe mensual N° 36.
- Bolsa de Cereales. (2021). Obtenido de Bolsa de Cereales: <https://www.bolsadecereales.com/>
- Borrás, L. & Otegui, M. E (2001). Maize Kernel Weight Response to Post-Flowering Source-Sink Ratio. *Crop Science*, 41: 1816-1823.
- Cerrudo, A. A., Monzon, J. P., Di Matteo, J. A., Aramburu, F., Rizzalli, R. H. & Andrade F. H. (2013). Manejo del cultivo de maíz en ambientes con restricciones hídricas. Aapresid. *Siembra Directa*, 15-20.
- Ciancio, N., Parco, M., Incognito, S. J. P. & Maddonni G. A. (2016). Kernel setting at the apical and sub-apical ear of older and newer Argentinean maize hybrids. *Field Crops Research*, 191: 101-110.
- Cirilo, A. G. & Andrade, F. H. (1994). Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science*, 34: 1044-1046.

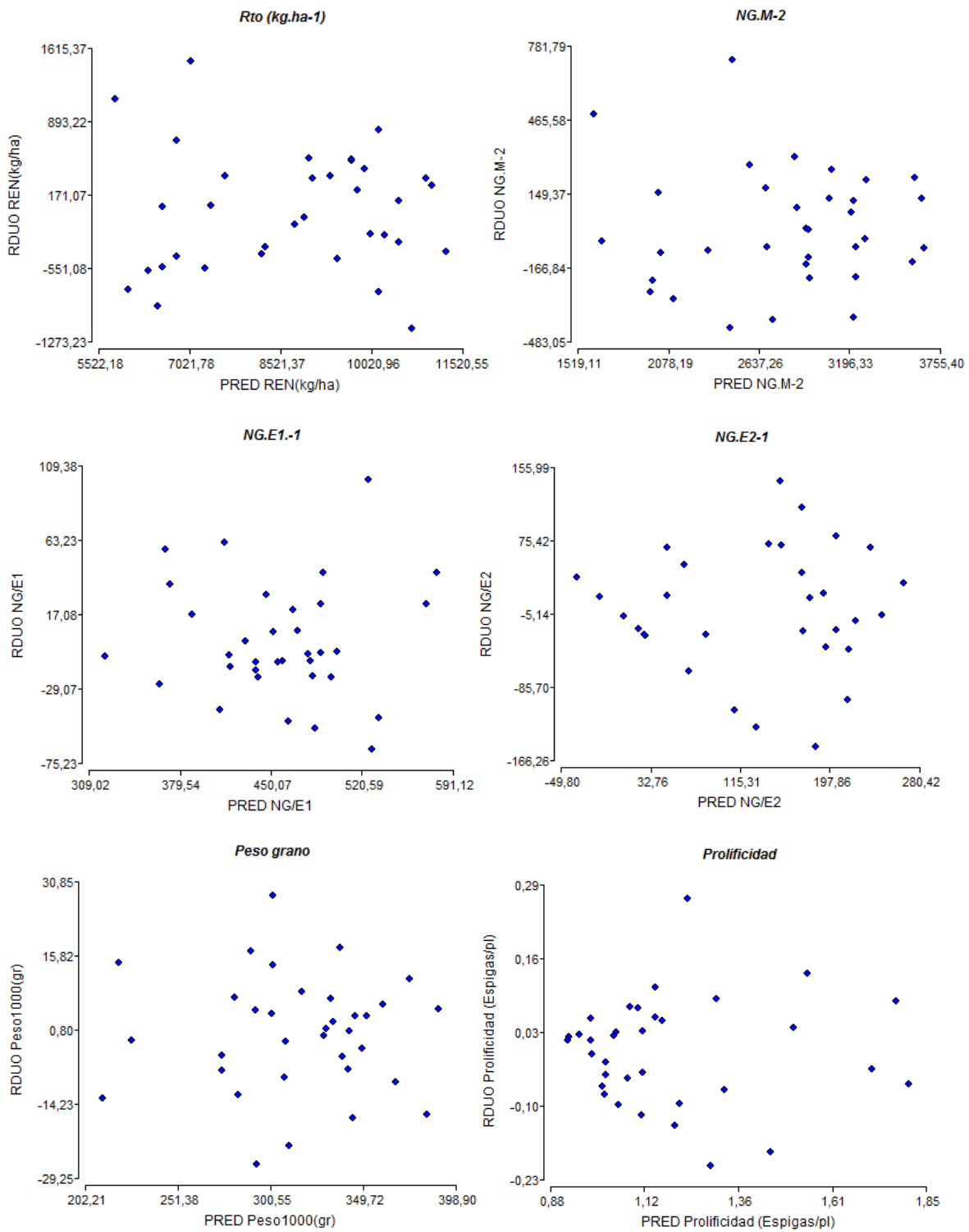
- Cirilo, A. G., Andrade F. H., Otegui M. E., Maddonni G. A., Vega C. R. & Valentinuz, O. (2012). Ecofisiología del cultivo de maíz. En G. H. Eyhérabide, *Bases para el manejo del cultivo de maíz* (pp 36-37, 44-46). INTA Pergamino.
- Cox, W. J. (1996). Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. *Agronomy Journal*, 88: 489-496.
- Di Matteo, J. A., Ferreyra, J. M., Cerrudo, A. A., Echarte, L. & Andrade, F. H. (2016). Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. *Field Crops Research*, 197: 107-116.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Doebley, J., Stec, A. & Hubbard, L. (1997). The evolution of apical dominance in maize. *Nature*, 386: 485-488.
- Echarte, L., Luque, S., Andrade, F. H, Sadras, V., Cirilo, A. G., Otegui, M. & Vega, C. R. (2000). Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Research*, 68, 1–8.
- Echarte, L., Andrade, F. H., Vega, C. R. & Tollenaar, M. (2004). Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Science*, 44: 1654-1661.
- Edmeades, G. & Daynard, T. (1979). The development of plant-to-plant variability in maize at different planting densities. *Canadian Journal of Plant Science*, 59: 561-576.
- Eyhérabide, G. H. (2012). Prólogo. En G. H. Eyhérabide, *Bases para el manejo del cultivo de maíz* (pp 3). INTA Pergamino.
- FAO. (2019). Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Fischer, K. S. & Palmer, F. E. (1984). Tropical maize. En P. R. Goldsworthy & N. M. Fischer, eds. *The physiology of tropical field crops* (pp. 213-248). New York, USA: J. Wiley & Sons.
- Hall, A. J., Lemcoff, J. H. & Trapani, N. (1981). Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*, 26: 19-38

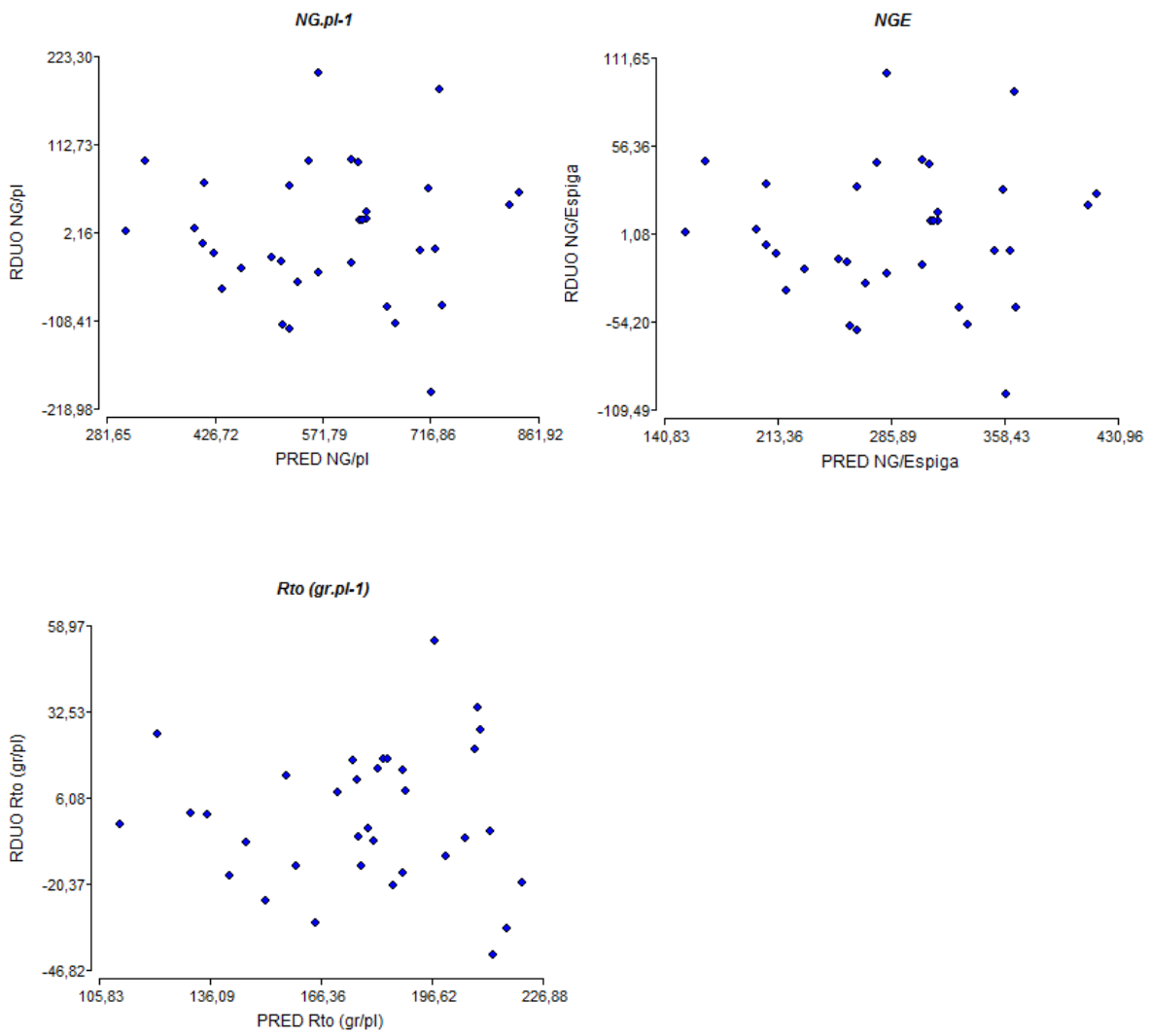
- Kiniry, J. & Ritchie, J. (1985). Shade-sensitive interval of kernel number of maize. *Agronomy Journal*, 77: 711–715.
- Maddonni, G. A., Otegui, M. E. & Bonhomme, R. (1998). Grain yield components in maize: II. Postsilking growth and kernel weight. *Field Crops Research*, 56: 257-264.
- Maddonni, G. A. & Otegui, M. E. (1996). Leaf area, light interception and crop development in maize. *Field Crops Research*, 48: 81-87.
- Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercu, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G. & Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184: 145-154.
- Otegui, M. E. (1995). Prolificacy and grain yield components in modern Argentinian maize hybrids. *Maydica*, 40: 371-376.
- Otegui, M. E., Andrade, F. H. & Suero, E. E. (1995). Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, 40: 87-94.
- Otegui, M. E. & Melón, S. (1997). Kernel set and flower synchrony within the ear of maize: I. Sowing date effects. *Crop Science*, 37: 441-447.
- Ross, F. (2014). Plasticidad y productividad del maíz en ambientes someros. Chacra experimental integrada Barrow. Convenio MAA, Buenos Aires-INTA.
- Ross, F., Di Matteo, J. A. & Cerrudo, A. A. (2020). Maize prolificacy: A source of reproductive plasticity that contributes to yield stability when plant population varies in drought-prone environments. *Field Crops Research*, 247: 107699.
- Rotili, D. H., Giorno, A., Tognetti, P. M. & Maddonni, G. A. (2019). Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agricultural Water Management*, 226, 105761.
- Sarquís, J. I., Gonzales, H. & Dunlap, J. R. (1998). Yield responses of two cycles of selection from a semiprolific early maize (*Zea mays* L.) population to plant density, sucrose infusion and pollination control. *Field Crops Research*, 55: 109-116.
- Satorre E. H. 2014. Maíz - Técnicas probadas para una producción rentable. CREA. Cap.: Respuesta del cultivo a la densidad, distancia entre hileras y uniformidad. 27-30.

- Thompson, L. M. (1986). Climatic change, weather variability and corn production. *Ergonomics Journal*, 78: 649-653.
- Tollenaar, M. & Daynard, T. B. (1978). Effect of defoliation on kernel development in maize. *Canadian Journal of Plant Science*, 58: 207-212.
- Tollenaar, M. (1992). Is low plant density a stress in maize? *Maydica*, 37: 305-305.
- Tollenaar, M., Dwyer, L. & Stewart, D. (1992). Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science*, 32: 432-438.
- Valentinuz, O. R., Cebada, S. & Sanchez, C. (2007). Contribución de espigas y macollos al rendimiento de híbridos en distintas densidades. Actualización técnica de Maíz. EEA Paraná, Entre Ríos, Argentina. Serie Extensión N°44: 43-46.
- Vega, C. R. & Andrade, F. H. (2000). Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras. En F. H. Andrade & V. O. Sadras, *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 97-133). INTA-UIB.
- Vega, C. R., Sadras, V. O., Andrade, F. H. & Uhart, S. A. (2000). Reproductive allometry in soybean, maize and sunflower. *Annals of Botany*, 85: 461-468.
- Vega, C. R., Andrade, F.H. & Sadras, V.O. (2001a). Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. *Field Crops Research*, 72:163-175.
- Vega, C. R., Andrade, F. H., Sadras, V. O., Uhart, S. A. & Valentinuz, O. R. (2001b). Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science*, 41: 748-754.

Anexos

Homogeneidad de varianzas:





Normalidad:

