

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE PLANTAS SOBRE LA CALIDAD DE LOS GRANOS EN
HÍBRIDOS PROLÍFICOS DE MAÍZ (*Zea mays*)**

Trabajo Final de Grado
de la alumna



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

Pergamino, 21 de febrero de 2022

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE PLANTAS SOBRE LA CALIDAD DE LOS GRANOS EN
HÍBRIDOS PROLÍFICOS DE MAÍZ (*Zea mays*)**

Trabajo Final de Grado

de la alumna

MARÍA ANTONELLA CONTI

Aprobada por el Tribunal Evaluador

Ing. Agr. Marcelo Ferrer
Evaluador

Ing. Agr. Antonio Díaz Paleo
Evaluador

Ing. Agr. Luciana Galizia
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 de 2022

Índice

1. Introducción	4
a. El cultivo de Maíz	4
b. Ecofisiología del cultivo de Maíz	4
i. Temperatura	5
ii. Fotoperíodo	5
iii. Rendimiento	6
c. Calidad del grano de Maíz	7
d. Manejo de la densidad y mecanismos de compensación del Maíz	9
2. Hipótesis	12
3. Objetivo general	12
4. Objetivos específicos	12
5. Materiales y métodos	12
6. Mediciones	13
7. Análisis estadísticos	15
8. Resultados	15
a. Supuestos	15
b. Prolificidad	16
c. Componentes Numéricos del Rendimiento	16
i. Rendimiento (rto) y Número de Granos (NG.m ⁻²)	17
ii. Peso de Grano (PG)	18
iii. Número de Espigas por unidad de superficie (NE.m ⁻²)	19
iv. Numero de Granos por Espiga (NGE)	19
d. Componentes de Calidad	19
i. Peso Hectolítrico (PH)	20
ii. Contenido de Almidón (ALM) y Proteína (PR)	20
e. Plasticidad Fenotípica	21
f. Correlaciones	23
9. Discusión	25
10. Conclusiones	27
11. Bibliografía	28
12. Anexos	33

Introducción

El cultivo de Maíz

El maíz, *Zea mays*, es una especie perteneciente a la familia de las Poáceas, comúnmente llamadas gramíneas, y presenta un metabolismo C4, lo que significa que su sistema fotosintético le permite convertir radiación en biomasa con gran eficiencia.

El maíz tiene una gran relevancia económica a nivel mundial. Si bien la producción de grano es la razón principal del cultivo del maíz, todas las partes de la planta son utilizadas para diversos fines (Watson, 1988). Dentro de estos múltiples usos se pueden destacar su utilización como alimento humano y animal (ya sea como grano, harina, forraje o industrializado), como fuente de numerosos subproductos industriales (Andrade et al., 1996) y para la producción de bio-combustibles.

Dentro de las especies cultivadas a nivel mundial, el maíz ocupa el primer lugar de importancia en cuanto a volumen producido, seguido por el trigo y el arroz. Se producen 1.148 millones de toneladas (t) de maíz al año en un área de 197 millones de hectáreas (ha) y un rendimiento (rto) promedio de 5,8 t/ha. Más del 50% del maíz se produce en el continente americano, siendo los principales países productores Estados Unidos (en primer lugar), Brasil y Argentina. Estados Unidos también es el principal país exportador, con 41,5 millones de t, seguido por Brasil y Argentina con 36 millones de t (FAO, 2019).

En la Argentina, en la campaña 2020/2021, la producción fue de alrededor de 50,5 millones de t, con un área sembrada de 6,6 millones de ha, y un rendimiento promedio de 7,86 t/ha (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 sudeste de Córdoba, alcanzando valores promedio de 10 t/ha (Bolsa de Cereales, 2021).

El clima de esta región es subhúmedo a húmedo con escaso déficit hídrico. El promedio de las lluvias anuales es de aproximadamente 980 mm, concentradas en la época estival y con escasas lluvias durante el invierno. La temperatura media anual es de 17°C con un período libre de heladas de 266 días (Menéndez & Hilbert, 2013).

Ecofisiología del cultivo de Maíz

El desarrollo del cultivo de maíz está regulado por dos factores ambientales: la temperatura y el fotoperíodo.

Temperatura

El desarrollo fenológico tiene una respuesta universal a la temperatura, no existiendo genotipos ni etapas insensibles a este factor. Dentro de un rango de temperaturas (temperatura base y temperatura óptima), a medida que se expone el cultivo a temperaturas crecientes el desarrollo del mismo se acelera, lo que determina que la duración de cualquier etapa de desarrollo transcurra más rápidamente (Sadras et al, 2000). Cuando se llega a la temperatura óptima se alcanza la máxima tasa de desarrollo. Pasada dicha temperatura, la tasa de desarrollo comienza a disminuir hasta detenerse al alcanzar la temperatura máxima. Por encima de dicha temperatura crítica (que depende del estado fenológico en que se encuentre el cultivo) y por debajo de la temperatura base (8°C para el maíz) el cultivo no se desarrolla (Cirilo & Andrade, 1994).

La duración del ciclo del cultivo se puede medir en unidades que ponderan el tiempo calendario por la temperatura a la que las plantas han estado creciendo, y se denomina tiempo térmico (TT), con unidades de grados-día (°C d). De esta manera, la duración de cualquier etapa de desarrollo se independiza de la temperatura a la cual transcurre (Monteith, 1977). El cálculo del tiempo térmico acumulado para una determinada etapa del ciclo ontogénico se realiza mediante la siguiente ecuación, que tiene validez para el rango de temperaturas comprendidas entre la temperatura óptima y la temperatura base:

$$TT (\text{°C d}) = \sum (T_m - T_b)$$

Donde T_m es la temperatura media diaria y T_b es la temperatura base.

En función del genotipo, el requerimiento térmico de cada etapa del cultivo puede variar. Sin embargo, del período comprendido entre la floración (R1) y la madurez relativa, varía entre 600 y 900 °C d acumulados sobre una temperatura base de 8 °C, siendo este, un carácter de alta estabilidad (Fischer & Palmer, 1984).

Fotoperíodo

El fotoperíodo es otro factor importante que afecta la tasa de desarrollo del maíz, y hace referencia a la duración del día, siendo el estímulo percibido por las hojas y transmitido al ápice de crecimiento. Existe una "fase juvenil" durante la cual el maíz no es sensible al fotoperíodo, lo que pone un límite mínimo para la duración de la fase vegetativa, es decir, determina un número mínimo de hojas (Kiniry et al, 1983). La duración de esta fase para maíz se estima entre 165 y 235 °C d (Otegui et al, 2000).

El maíz es una especie cuantitativa de día corto. Esto quiere decir que la duración de una determinada etapa del desarrollo se incrementa ante aumentos en el fotoperíodo (alargamiento de los días). Hay un rango de fotoperíodo óptimo, en el cual la tasa de desarrollo se hace máxima y una determinada etapa ontogénica se alcanza en tiempo mínimo. Existe también un fotoperíodo umbral por debajo del cual las variaciones en la duración del día no lo afectan. Este umbral varía entre genotipos, pero, en términos generales, puede ubicarse entre 12 y 13 horas (Kiniry et al, 1983).

En la región núcleo, el fotoperíodo máximo es de 14 horas y media aproximadamente.

Rendimiento

El rendimiento (rto) de un cultivo se mide al finalizar el ciclo del mismo. Sin embargo, este se va generando durante todo ciclo debido a los aportes que van realizando las diferentes estructuras del cultivo. Los dos componentes numéricos principales del rto son: el número de granos (NG) por unidad de superficie y el peso promedio individual de los granos (PG), estando el NG más relacionado con las variaciones en el rto (Cirilo & Andrade, 1994).

$$\text{Rto (gr.m}^{-2}\text{)} = \text{NG (granos.m}^{-2}\text{)} \times \text{PG (gr.grano}^{-1}\text{)}$$

Estos dos parámetros suelen estar negativamente relacionados, es decir, cuando el NG por unidad de superficie aumenta, el peso de los mismos disminuye, y viceversa.

A su vez, el NG por unidad de superficie va a estar determinado por el NG por estructura reproductiva (espigas, en el caso del maíz) y el número de estructuras reproductivas por unidad de superficie. Este último parámetro va a depender del número de estructuras reproductivas por planta y el número de plantas por unidad de superficie.

La mayor limitante del cultivo de maíz no es la generación de estructuras capaces de originar granos (mayor NG, mayor rto), sino la supervivencia de las mismas (Cirilo & Andrade, 1994). Por eso es importante conocer el momento en el que queda establecido el NG. Este momento se denomina "período crítico" (PC) y ocurre 30 días alrededor de floración femenina (R1), es decir, 15 días antes y 15 días después. Cualquier estrés que ocurra durante dicho período provocaría mayores mermas de rendimiento que si ocurriese en cualquier otro momento. Durante la primera mitad del PC se fija el número de espigas (NE) por planta, mientras que, en la segunda mitad, luego de la emergencia de los estigmas, se determina el NGE y comienza el llenado de los granos. Entonces, la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico establece las condiciones para fijar el NG y la sobrevivencia de la mayor cantidad posible de ellos. Por eso, uno de los puntos más

importante a tener en cuenta es disponer de altos contenidos hídricos en el suelo durante dicho período (Giménez, 2010).

En cuanto al PG, éste va a depender de la duración del período de llenado y de la de tasa de acumulación de materia seca, siendo esta última la que explica en mayor medida el peso final de los granos (Borrás & Otegui, 2001).

Luego de la fecundación, el grano atraviesa tres etapas de crecimiento las cuales van a determinar el peso final del mismo. La primera de ellas se denomina fase “lag” y es una etapa donde prácticamente no hay aumento de peso. Lo que ocurre en esta fase es que se establece el número de células endospermáticas y se forman los posibles lugares para la deposición de almidón (Jones et al, 1996). Entonces, en esta fase queda determinado el NG y el peso potencial de los granos (Cirilo & Andrade, 1994). Esta fase dura entre 10 y 15 días, y el final de la misma coincide con el fin del PC.

La siguiente fase se denomina fase de “llenado efectivo”. En este momento se depositan los principales componentes del grano (almidón, proteínas, aceite) y se produce el 80% del aumento de peso. Cuando las temperaturas son elevadas (mayores a 23°C), se incrementa la tasa de llenado, pero ésta no compensa la disminución del tiempo de llenado, dando como resultado granos con menor peso final (Thompson, 1986).

El llenado de los granos está limitado por fuente, y las condiciones durante esta etapa pueden modificar el peso de los mismos dependiendo de la cantidad de fuente disponible por grano. Por ejemplo, reducciones en la densidad del cultivo aumentan la cantidad de fuente por grano (Cirilo & Andrade, 1996).

En la última etapa, el llenado del grano cesa, se alcanza la madurez fisiológica (MF) y el máximo peso seco del grano. A partir de ahí, y hasta la cosecha, a los granos solo les resta perder humedad.

Calidad del grano de Maíz

La definición de calidad depende del mercado y del producto final que la industria desee obtener. La calidad de uso del maíz está determinada principalmente por la estructura y composición del grano. Las diferencias en estructura y composición dependen del cultivar, así como de las prácticas de manejo, el clima, el suelo y los métodos de cosecha y postcosecha. Los cultivares de maíz difieren en atributos de la calidad del grano, tanto físicos como químicos (Eyhéabide et al., 2007)

El grano de maíz es un fruto de una sola semilla llamado cariopse, con peso promedio de 150-350 mg, en el cual el tegumento o testa se encuentra adherido a la semilla. Las paredes del fruto, el pericarpio (6-8% del grano), se va adhiriendo al tegumento a medida que el fruto madura. La fertilización del óvulo da lugar a la formación del embrión y el endosperma. Este último ocupa entre el 80% y el 90% del peso seco del grano maduro, y es el principal lugar donde se almacenan el almidón y las proteínas. El embrión (1,5% del peso seco total) presenta un eje embrionario y un solo cotiledón, el escutelo (5-7%), importante para la germinación (Aguirrezábal & Andrade, 1998). En el embrión se encuentra la mayor parte de los lípidos del grano.

En cuanto a la calidad desde el punto de vista de la composición química del grano, la mayor parte son hidratos de carbono (67%-74%) y tiene, en menor proporción, aceite (3%-11%) y proteínas (8%-12%) (Watson & Ramstad, 1987). Estos rangos de variaciones se deben al genotipo y al ambiente en el que se encuentre creciendo el cultivo.

El hidrato de carbono cuantitativamente más importante del grano de maíz es el almidón, el cual se encuentra en el endosperma como gránulos insertados en una matriz proteica. El almidón está formado por dos polisacáridos: amilosa y amilopectina, esta última es la más abundante (70%-80% de los gránulos). Sin embargo, existen genotipos modificados con diferentes proporciones de cada polisacárido (Alexander, 1998).

Dado el interés actual para el reemplazo de combustibles fósiles por biocombustibles, el maíz surge como una alternativa factible para la obtención de etanol combustible mediante la fermentación alcohólica de su fracción amilácea, ya que es una de las fuentes más abundantes y económicas de almidón (Maisch, 1987).

El maíz se utiliza fundamentalmente como fuente de energía en la alimentación de monogástricos por su alto porcentaje de carbohidratos, pero puede hacer una contribución importante a los requerimientos proteicos, particularmente cuando interviene en una elevada proporción en la ración.

Las proteínas que se encuentran en el endosperma son: albúminas, globulinas, glutelinas y prolaminas. De estas, las primeras dos son estructurales, mientras que las otras son de reserva. Las prolaminas, que en maíz se conocen como zeínas, junto con las glutelinas representan el 90% del total de proteínas, y ambas se acumulan desde principios del llenado efectivo hasta la madurez. En cambio, las albúminas, que son responsables de la acumulación de almidón, comienzan su acumulación desde la fecundación alcanzando un

máximo a principios del llenado efectivo y luego decrece. Por último, las globulinas se acumulan durante todo el llenado efectivo del grano a tasas muy bajas (Tsai et al, 1978).

El contenido de proteína de los granos está fuertemente influenciado por el genotipo, sin embargo, puede variar debido a las condiciones ambientales y la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Uribelarrea et al., 2009). También, se sabe que reducciones en la densidad del canopeo aumentan la concentración de proteína en granos de maíz (Borrás et al., 2003).

Manejo de la densidad y mecanismos de compensación del Maíz

En maíz, existe una fuerte relación entre la densidad de plantas, el rto y la disponibilidad de recursos durante el período crítico. Es una herramienta efectiva para obtener canopeos eficientes y aprovechar la luz solar incidente (Maddonni & Otegui, 1996). El cultivo alcanza su máxima tasa de crecimiento cuando el área foliar le permite capturar el 95% de la radiación incidente (IAF crítico) (Andrade et al., 1996). Dicha cobertura se debe alcanzar al inicio del PC para maximizar el rto, y la cantidad de plantas por unidad de superficie necesaria para lograrla es función del área foliar de cada planta, de la disposición de sus hojas y de la distribución espacial de las plantas sobre el terreno.

Los componentes de rto que son afectados por la densidad son el $NE.pl^{-1}$, el NGE y el PG, y el rto de maíz muestra una estrecha relación con el número de granos producidos, es decir, está fuertemente asociado con el $NG.m^{-2}$.

La competencia, definida como el proceso a través del cual las plantas comparten recursos que están provistos en forma insuficiente para satisfacer su demanda combinada (Satorre, 1988), es el proceso de mayor importancia en la regulación de las respuestas del cultivo a la densidad. Como consecuencia de la competencia, hay una reducción en la supervivencia, crecimiento y rendimiento de las plantas individuales, o de su fecundidad.

En el cultivo de maíz, la competencia se denomina intraespecífica, es decir, entre individuos de una misma especie. A su vez, al tratarse de híbridos (plantas con genotipos iguales), es esperable que las necesidades y uso de recursos limitantes entre los individuos del cultivo sean semejantes, resultando, de esta manera, en una mayor competencia (Satorre, 1988). Esta competencia intraespecífica por la captura de los recursos afecta la estructura del cultivo. A partir del momento en que las plantas comienzan a competir, el incremento en la densidad determina una reducción del tamaño de las plantas, en el caso del maíz, a través de un menor tamaño de las hojas.

En este cultivo, el rto por unidad de superficie presenta una respuesta parabólica al aumento de la densidad. Lo que ocurre a medida que se aumenta la densidad de plantas

es que el rto por planta disminuye, mientras que el rto del cultivo aumenta, pero hasta una densidad óptima, a partir de la cual el rto cae. Esto se debe a que las diferentes estructuras de la planta compiten por los recursos y al tener el maíz dominancia apical, la panoja es el órgano prioritario mientras que la espiga es un órgano secundario. A su vez, la espiga apical o espiga primaria va a ser prioritaria respecto a las espigas secundaria y terciaria. Entonces, al aumentar la densidad, aumenta la competencia entre plantas ocasionando una reducción del tamaño de las espigas (menor NG) o del número de las mismas por unidad de superficie (menor $NE.pl^{-1}$).

También, la competencia entre plantas ocasionada por densidades altas da como resultado una reducción no solo en el rto de grano de la planta, sino también reduce el contenido de proteína y aceite del grano (Al-Naggar et al., 2016).

Por otro lado, la sensibilidad del rto y de la biomasa producida ante disminuciones en la densidad de plantas, depende de la plasticidad del genotipo utilizado en la generación y fijación de estructuras reproductivas adicionales por plantas (Edmeades & Daynard, 1979), es decir, de espigas. La capacidad de las plantas para fijar más de una espiga fértil por planta (espiga apical y sub apical) se denomina prolificidad (Pan et al., 1984). La prolificidad ha sido propuesta como un indicador de la plasticidad reproductiva del maíz (Sarquís et al., 1998). Sin embargo, los genotipos comunmente utilizados no son prolíficos (no tienen la capacidad de fijar más de una espiga por planta). En los genotipos prolíficos, en comparación con los no prolíficos, al disminuir la densidad de plantas el NG de la espiga sub apical aumenta contribuyendo al rto evitando que disminuya de manera tan marcada.

Entonces, al aumentar la densidad de siembra hasta la densidad óptima el $NG.m^{-2}$ aumenta, pero esto va acompañado de una disminución de la prolificidad ($NE.pl^{-1}$) y del PG. Por otro lado, por debajo de la densidad óptima no se alcanza la eficiencia de intercepción de la luz del 95% (no se llega al IAF crítico) dado que este cultivo no tiene la capacidad de aumentar su área foliar de manera significativa para cerrar los entre surcos (Cox, 1996) afectando el crecimiento del cultivo y obteniendo un rto por debajo del potencial.

Por lo tanto, el rto en grano de maíz no es estable ante variaciones en la densidad de plantas (Vega & Andrade, 2000), por encima o por debajo de la densidad óptima, se obtiene un rendimiento sub óptimo. A partir de una adecuada elección de la densidad de siembra, el cultivo puede crecer en condiciones de elevada competencia maximizando el uso de los recursos por unidad de superficie y el rto (Satorre, 1999). La densidad óptima de siembra para el cultivo de maíz, varía de acuerdo al genotipo utilizado, al ambiente y la época en que se siembra. Para la zona núcleo, y en condiciones de buena oferta ambiental, la

densidad óptima para un maíz de primera es de unas 80 mil plantas por ha (Andrade et al., 1996).

Por lo dicho anteriormente, se puede decir que el maíz normalmente posee limitada capacidad de compensación ante disminuciones de la densidad de siembra, la cual puede maximizarse mediante la utilización de genotipos prolíficos o macolladores, pero los híbridos comúnmente utilizados para la producción de maíz no poseen dichas características.

En las últimas décadas, la producción de maíz en la Argentina ha aumentado, en parte, debido a la expansión de este cultivo a áreas no tradicionales, de baja productividad, como las zonas semiáridas de la región pampeana (hacia el sur y el oeste de la misma), y a áreas más marginales (MAGyP, 2021). Dichas áreas se caracterizan por precipitaciones erráticas o escasas y suelos pobres (tanto en calidad física como química) (MacDonald et al., 1995).

En estos ambientes se adoptaron diferentes prácticas defensivas para poder llevar a cabo el cultivo de maíz. Algunas de estas estrategias son el atraso de la fecha de siembra (Maddonni, 2012), baja densidad de plantas (Rotili et al., 2019) y baja o nula aplicación de fertilizantes nitrogenados (MacDonald et al., 1995).

La densidad de plantas adoptada por los productores en estos ambientes propensos a la sequía, es baja para asegurar la disponibilidad de recursos por planta y que todas se encuentren por encima del umbral mínimo para la fijación de granos (Aramburu Merlos et al., 2015).

Los materiales prolíficos presentan generalmente más estabilidad del rendimiento ante disminuciones en la densidad (Sarquís et al., 1998). Es por ello que la prolificidad podría contribuir al manejo defensivo de la densidad de plantas en los ambientes previamente mencionados, como lo sugirió Magson (1997), y mejorar el rendimiento obtenido por el aporte de los granos de la espiga sub apical (Pan et al., 1995).

En cuanto a la calidad de los granos en dichos ambientes y lo que ocurre con la misma ante disminuciones en la densidad, hay muy poca información al respecto; y en términos de híbridos prolíficos, no hay, hasta el momento, información sobre variaciones o cambios en la calidad de los granos en diferentes ambientes. El objetivo de este trabajo es determinar si existen diferencias de calidad entre los granos de las espigas apical (E1) y sub apical (E2) de híbridos de maíz prolíficos, y su interacción con ambientes de recursos contrastantes a partir de cambios en la densidad.

Hipótesis

En híbridos prolíficos de maíz (i) la calidad de los granos de la espiga apical es mayor que la calidad de los granos de la espiga basal y (ii) aumenta en ambas espigas al disminuir la densidad de plantas.

Objetivo general

Evaluar si existen diferencias en la calidad de grano entre la primera y segunda espiga de híbridos prolíficos de maíz al disminuir la densidad de siembra.

Objetivos específicos

- Caracterizar los híbridos por el nivel de prolificidad en cada ambiente.
- Evaluar componentes numéricos de rendimiento particionados entre primera y segunda espiga: número de espigas por metro cuadrado, número de granos por espiga, peso de granos.
- Evaluar aspectos de calidad de grano particionados entre primera y segunda espiga: peso hectolítrico, contenido de proteína y contenido de almidón.
- Analizar las diferencias entre primera y segunda espiga, para cada híbrido y ambiente.

Materiales y métodos

Se realizó un ensayo a campo en la localidad de Pergamino en el campo experimental del Criadero de Semillas ACA en la campaña 2019/2020. Se generaron 3 ambientes a partir de diferentes densidades de siembra: 4 plantas.m⁻², 6 plantas.m⁻² y 8 plantas.m⁻², densidad baja (DB), media (DM) y alta (DA), respectivamente. El ensayo se sembró con un diseño factorial en bloques, con 3 repeticiones. La unidad experimental consistió en 4 surcos de 5 metros de largo con un espaciamiento entre hileras de 70 cm, asignándose a cada una de las parcelas uno de dos híbridos prolíficos: ACA470VT3P (H 470) y ACA481VT3P (H 481).

Modelo estadístico utilizado:

$$Y_{ijkl} = \mu + H_i + D_j + E_k + (HD)_{ij} + (HE)_{ik} + (DE)_{jk} + (HDE)_{ijk} + Rep_l + e_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} es el valor de la respuesta para el híbrido i , la densidad j , la espiga k y la repetición l .

μ es la media general.

H_i es el efecto del híbrido i .

D_j es el efecto de la densidad j .

E_k es el efecto de la espiga k .

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

$(HE)_{ik}$ es el efecto de la interacción entre el híbrido i y la espiga k .

$(DE)_{jk}$ es el efecto de la interacción entre la densidad j y la espiga k .

$(HDE)_{jkl}$ es el efecto de la interacción entre el híbrido i , la densidad j y la espiga k .

Rep_l es el efecto de la repetición l .

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

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

El ensayo se sembró el 24 de octubre del 2019 con una sembradora experimental Baumer de 4 surcos a 70 cm, con dosificador a cono, colocando 40 semillas por surco. Junto con la siembra se realizó una fertilización de 160 kg.ha⁻¹ de urea + 80 kg.ha⁻¹ de microessentials SZ (N 10%, P 20%, S 10%, Zn 1%), y se aplicaron pre emergentes: 1 lt.ha⁻¹ de Acuron Uno (biciclopirona) + 1 lt.ha⁻¹ de ACA Margen Pro (s-metolacoloro 96%) + 0,2 lt.ha⁻¹ de Toque ACA (lambdacialotrino 5%).

Para llegar a la densidad objetivo se realizó el raleo a mano el día 15 de noviembre. El 27 del mismo mes se aplicó un post emergente: 0,1 lt.ha⁻¹ de Convey (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 hizo a mano el 20 de abril del 2020, cosechando los dos surcos centrales de cada parcela y separando primeras y segundas espigas (E1 y E2, respectivamente).

Mediciones

Se determinó el nivel de prolificidad como el número de espigas (NE) por planta de cada unidad experimental mediante la relación entre espigas cosechadas (E1 + E2) y plantas cosechadas. Se calculó el rendimiento por espiga (rtoE1 y rtoE2) a partir del peso de los granos de todas las espigas de la parcela (E1 y E2 por separado) corregido a 14,5% de humedad. Con la suma de ambos rendimientos se obtuvo el rto total.

Utilizando muestras de cada espiga (E1 y E2 por separado) de cada parcela, se obtuvo el peso de 100 granos (P100) de las espigas, con lo que se estimó el peso individual de los granos (PG). A partir del P100 y el rto se calculó el número de granos (NG) por metro cuadrado.

Se obtuvo el NE por metro cuadrado a partir de la relación entre el NE cosechadas y el área cosechada (7 m²). Con este dato y el NG por metro cuadrado se obtuvo el número de granos por espiga (NGE).

Para cada muestra se determinó también el contenido de proteína (%PR) y el contenido de almidón (%ALM) utilizando un equipo NIRS FOSS XDS previamente calibrado para esos componentes con muestras de grano entero. La ecuación de predicción de %PR cuenta con un error estándar de validación cruzada (SECV) de 0,49% y un coeficiente de determinación entre datos de química húmeda y predichos (R²) de 0,90. La ecuación de predicción de %ALM cuenta con SECV=1,1% y R²=0,72. Adicionalmente se estimó el peso hectolítrico (PH en kg.lt⁻¹) a partir del peso (gr) de 200 ml de muestra de granos.

Se obtuvo el rendimiento de proteína y almidón por unidad de superficie (rtoPR y rtoALM) al multiplicar el rto por el %PR y el %ALM.

Para evaluar la plasticidad fenotípica del cultivo ante cambios en la densidad de siembra se calculó el porcentaje de variación respecto de la densidad más alta (8 pl.m⁻²) para aquellas variables en que la densidad resultó significativa.

Todas las mediciones se partitionaron para cada parcela entre primera y segunda espiga.

Por otro lado, se tomó la fecha de floración femenina (R1), se calculó el Índice de Área Foliar (IAF) al inicio del llenado de granos, y se realizaron mediciones con SPAD al momento de madurez fisiológica.

Las mediciones de SPAD se realizaron con el equipo Minolta SPAD502. Dichos valores corresponden a la cantidad de clorofila presente en las hojas de las plantas, y son calculados basándose en la cantidad de luz que transmite la hoja en dos longitudes de onda en las cuales la absorbancia de la clorofila es diferente. Estas mediciones se realizaron en la hoja de la espiga apical de tres plantas por parcela, con lo que luego se calculó el promedio de la parcela.

El IAF, que es el cociente del área total de las hojas verdes de una planta al área del suelo que ella ocupa, se estimó utilizando la siguiente metodología (Moreno-Sotomayor et al, 2002):

Se determinó el área foliar de la hoja bandera (AFhB) utilizando los datos de ancho (AB) y largo (LB) de la misma. El área foliar de la hoja corresponde al 75% del rectángulo ancho x largo:

$$\mathbf{AFhB = AB \times LB \times 0.75}$$

De la misma manera se determinó el área foliar de la hoja de la espiga (AFhE):

$$\mathbf{AFhE = AE \times LE \times 0.75}$$

Luego se estimó el área foliar de las hojas superiores del canopeo, considerando un aumento gradual del área foliar desde la hoja bandera hasta la hoja de la espiga.

Como ejemplo se presenta el aumento gradual del área foliar para una planta con 5 hojas entre la hoja de la espiga y la hoja bandera = $(\mathbf{AFhE - AFhB}) / 6$

$$AFhB - 1 = AFhB + (1 \times (AFhE - AFhB) / 6)$$

$$AFhB - 2 = AFhB + (2 \times (AFhE - AFhB) / 6)$$

$$AFhB - 3 = AFhB + (3 \times (AFhE - AFhB) / 6)$$

$$AFhB - 4 = AFhB + (4 \times (AFhE - AFhB) / 6)$$

$$AFhB - 5 = AFhB + (5 \times (AFhE - AFhB) / 6)$$

Las hojas inferiores del canopeo, es decir, las hojas verdes que se encontraban debajo de la espiga, se contabilizaron y se les asignó un área foliar similar al de la hoja de la espiga.

Con la sumatoria del área foliar por hoja verde al momento de la medición y la densidad de plantas por metro cuadrado se obtuvo el IAF. El valor por parcela se calculó como el promedio de los datos obtenidos de 3 plantas por parcela.

Análisis estadísticos

Los datos se analizaron estadísticamente mediante ANOVA utilizando el test de LSD Fisher al 5% para determinar las diferencias entre primera y segunda espiga para cada tratamiento, y también se realizaron análisis de correlaciones y regresión lineal.

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.

Resultados

Supuestos

Se cumplen los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (Anexos).

Tabla 1. Prolificidad (NE.pl⁻¹), Índice de Área Foliar (IAF) y mediciones con SPAD para tres densidades (8, 6 y 4 pl.m⁻²) y dos híbridos (470 y 481).

Densidad pl.m ⁻²	Híbrido	Prolificidad NE.pl ⁻¹	IAF	Spad	
8	470	1,10	3,0	b	50,5
	481	1,03	3,5	a	50,3
6	470	1,25	2,4	d	57,6
	481	1,30	2,6	c	51,4
4	470	1,80	1,5	e	51,7
	481	1,53	1,6	e	51,2
8		1,07	c	3,3	50,4
6		1,28	b	2,5	53,9
4		1,67	a	1,5	51,5
	470	1,40		2,3	52,7
	481	1,29		2,6	51,0
D		***	***		ns
H		ns	***		ns
D*H		ns	**		ns

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

Letras distintas entre filas indican diferencias significativas entre medias.

Prolificidad

La prolificidad (NE.pl⁻¹) presentó diferencias significativas entre densidades ($p < 0,001$), siendo mayor en la DB y disminuyendo al aumentar a DM y DA, obteniéndose valores de 1,67; 1,28 y 1,07; respectivamente. No se observaron diferencias entre híbridos ($p = 0,1776$) (tabla 1).

Componentes Numéricos del Rendimiento

Tabla 2. Efecto de la densidad de plantas (8, 6 y 4 pl.m⁻²) sobre el rendimiento (Rto), número de granos por unidad de superficie (NG.m⁻²), número de espigas por unidad de superficie (NE.m⁻²) número de granos por espiga (NGE) y peso de granos (PG), para dos híbridos (470 y 481) particionados por espigas (1 y 2).

Densidad pl.m ⁻²	Espiga	Híbrido	Rto kg.ha ⁻¹	NG.m ⁻²	NE.m ⁻²	NGE	PG mg
8	1	470	9170	3246	7,3	448	302
		481	10623	3435	8,2	419	318
	2	470	621	229	1,0	145	271
		481	286	94	0,4	165	303
6	1	470	7642	2761	5,8	477	314
		481	8353	2794	6,0	469	336
	2	470	1021	365	1,8	201	279
		481	1001	317	1,8	207	310
4	1	470	4501	2208	4,0	559	292
		481	5901	2017	3,9	515	344
	2	470	1962	753	3,1	238	257
		481	1033	331	2,0	177	307
8			10351	3502	4,2	294	301
6			9077	3117	3,9	338	312
4			6698	2654	3,3	372	300
	1		7702	2742	5,9	481	318
	2		985	347	1,7	188	288
		470	8261	3195	3,8	345	285
		481	9066	2996	3,7	325	321
Densidad (D)			***	***	**	*	ns
Híbrido (H)			ns	ns	ns	ns	***
Espiga (E)			***	***	***	***	***
D*H			ns	ns	ns	ns	ns
D*E			***	***	***	ns	ns
H*E			**	ns	ns	ns	ns
D*H*E			ns	ns	ns	ns	ns

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

Rendimiento (rto) y Número de Granos (NG.m⁻²)

Para todas las densidades se logró mayor rto en la E1 ($p < 0,001$).

Hubo interacción entre la densidad (D) y la espiga (E) ($p < 0,001$). En la E1 el rto promedio fue de 7702 kg.ha⁻¹ (tabla 2), lográndose el rto más alto, 9897 kg.ha⁻¹ en la DA y disminuyendo hasta 5201 kg.ha⁻¹ en la DB (tabla 3). Mientras que en la E2 el rto promedio fue de 985 kg.ha⁻¹ (tabla 2), obteniendo mayor rto en la DB, 542 kg.ha⁻¹, y menor en la DA, 161 kg.ha⁻¹ (tabla 3).

También se obtuvo interacción entre el híbrido (H) y la E ($p < 0,01$). El mayor rto se logró con la E1 del H 481 (8292 kg.ha⁻¹), seguido por la E1 del H 470 (7037 kg.ha⁻¹), y sin diferencias en el rto de la E2 entre H (tabla 4).

El rendimiento se explica en mayor medida por el NG.m⁻² ($R^2 = 0,96$) que por el PG ($R^2 = 0,24$) (figura 1). El NG.m⁻² fue distinto de acuerdo a la D y a la E ($D \times E \ p < 0,001$). El NG.m⁻² más alto se logró en la DA con la E1, obteniendo 3341 granos. Este valor se redujo en dicha espiga hasta 2112 granos en la DB. Contrario a lo que ocurrió en la E1, en la E2 el mayor NG.m⁻² se logró en la DB, 542 granos, reduciéndose a 161 granos en la DA (tabla 3) (figura 2).

Figura 1. Regresión lineal (a) entre rendimiento (rto) y NG.m⁻², y (b) entre rto y PG.

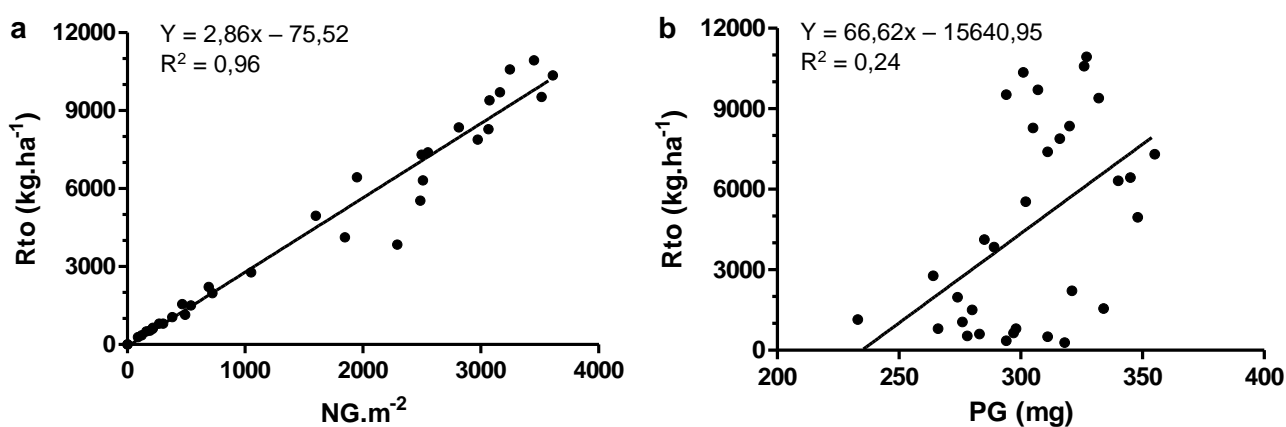
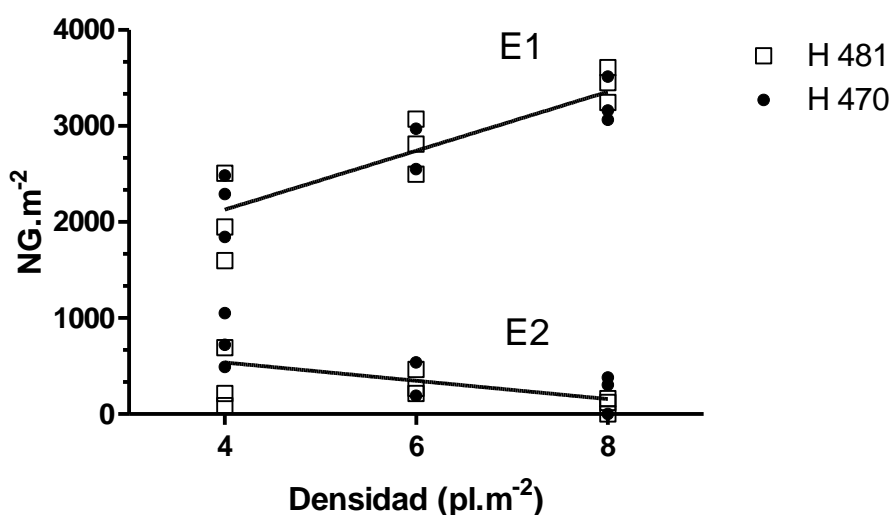


Figura 2. Regresiones de E1 y E2 para NG.m⁻² vs densidad de siembra, indicando con cuadrados el H481y con círculos el H 470.



Peso de Grano (PG)

El PG presentó diferencias entre H ($p < 0,001$) y entre E ($p < 0,001$), siendo mayor en el H 481 que en el 470 (321 mg.grano⁻¹ y 285 mg.grano⁻¹, respectivamente) y en la E1 que en la E2 (318 mg.grano⁻¹ y 288 mg.grano⁻¹, respectivamente) (tabla 2).

Número de Espigas por unidad de superficie (NE.m⁻²)

Existió interacción D*E ($p < 0,001$). El NE1 disminuyó al disminuir la D, mientras que el NE2 tuvo un comportamiento opuesto. El mayor NE1.m⁻² fue de 7,8 E.m⁻² en la DA, y el menor fue de 3,9 E.m⁻² en la DB. Mientras que el NE2.m⁻² pasó de 0,7 E.m⁻² en la DA a 2,6 E.m⁻² en la DB (tabla 3).

Número de Granos por Espiga (NGE)

El NGE tuvo diferencias entre D ($p < 0,05$) y también entre E ($p < 0,001$). Se obtuvo mayor NG en la E1 que en la E2, 481 y 188 granos respectivamente. En cuanto a la D, fue mayor el NGE en la DB que DA, 372 y 294 granos respectivamente (tabla 2).

Componentes de Calidad

Tabla 3. Medias de las variables en estudio que tuvieron la interacción entre densidad y espiga (D*E) significativa ($p < 0,05$).

Densidad (pl.m ⁻²) Espiga	8		6		4	
	1	2	1	2	1	2
Rto (kg.ha ⁻¹)	9897 a	454 e	8069 b	1009 de	5201 c	1498 d
NG (granos.m ⁻²)	3341 a	161 e	2781 b	336 de	2112 c	542 d
NE (NE.m ⁻²)	7,8 a	0,7 e	5,9 b	1,8 d	3,9 c	2,6 d
RtoPR (kg.ha ⁻¹)	830 a	38 e	678 b	86 de	434 c	120 d
RtoALM (kg.ha ⁻¹)	7056 a	320 e	5733 b	717 de	3712 c	1066 d

Letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre medias.

Tabla 4. Medias de las variables en estudio que tuvieron la interacción entre híbrido y espiga (H*E) significativa ($p < 0,05$).

Híbrido Espiga	470		481	
	1	2	1	2
Rto (kg.ha ⁻¹)	7037 b	1224 c	8292 a	773 c
PR (%)	8,24 bc	7,96 c	8,47 ab	8,69 a
RtoPR (kg.ha ⁻¹)	582 b	97 c	702 a	67 c
RtoALM (kg.ha ⁻¹)	5017 b	872 c	5904 a	548 c

Letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre medias.

Tabla 5. Efecto de la densidad de plantas (8, 6 y 4 pl.m⁻²) sobre el contenido de proteína (PR), contenido de almidón (ALM), peso hectolítrico (PH), y rendimiento de proteína (RtoPR) y de almidón (RtoALM) por unidad de superficie, para dos híbridos (470 y 481) particionados por espigas (1 y 2).

Densidad pl.m ⁻²	Espiga	Híbrido	PR	ALM	PH	RtoPR	RtoALM
			----- % -----	-----	kg.hl ⁻¹	-----kg.ha ⁻¹ -----	-----
8	1	470	8,38	71,3	79,5	768	6542
		481	8,38	71,3	79,7	891	7571
	2	470	8,12	70,6	79,4	50	439
		481	8,72	70,8	81,4	25	202
6	1	470	8,22	71,1	79,8	629	5433
		481	8,50	71,1	79,0	711	5934
	2	470	8,06	71,0	79,8	83	722
		481	8,77	71,3	79,1	89	714
4	1	470	8,13	71,5	79,5	364	3215
		481	8,49	71,3	78,7	503	4208
	2	470	7,80	71,7	78,8	154	1405
		481	8,56	70,7	79,4	87	727
8			8,40	71,1	79,8	434	4426
6			8,44	71,1	79,3	382	3225
4			8,25	71,3	79,1	277	2389
	1		8,36	71,3	79,4	645	5487
		2		8,35	71,1	79,3	81
		470	8,11	71,3	79,4	339	2944
		481	8,57	71,1	79,3	384	3226
Densidad (D)			ns	ns	ns	***	***
Híbrido (H)			***	ns	ns	ns	ns
Espiga (E)			ns	ns	ns	***	***
D*H			ns	ns	ns	ns	ns
D*E			ns	ns	ns	***	***
H*E			*	ns	ns	**	**
D*H*E			ns	ns	ns	ns	ns

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

Peso Hectolítrico (PH)

No se observaron cambios en el PH de los granos entre D, entre E ni entre H ($p=0,5937$; $p=0,9054$ y $p=0,9210$; respectivamente). Se obtuvo un valor promedio de 79,3 kg.hl⁻¹.

Contenido de Almidón (ALM) y Proteína (PR)

En cuanto al contenido de ALM de los granos, no existieron diferencias significativas entre H y E ($p=0,5584$ y $p=0,5257$ respectivamente), como tampoco para D ($p=0,7478$), obteniéndose un valor promedio de 71,2 %.

Por otro lado, el contenido de PR de los granos presentó diferencias entre H ($p < 0,001$) y se observó, también, interacción H*E ($p < 0,05$). La PR fue mayor en el H 481 que en el H 470, obteniéndose valores de 8,57 % y 8,11 % respectivamente (tabla 5). En cuanto a la interacción, el mayor contenido de PR se obtuvo en la E2 del H 481 (8,69 %), y el menor porcentaje se observó en la E2 del híbrido 470 (7,96 %) (tabla 4).

Al mirar el rendimiento de proteína (rtoPR) en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, se observa que existió interacción D*E ($p < 0,001$) y H*E ($p < 0,01$). En cuanto a la D, mayor rtoPR se logró con la E1 en la DA ($830 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), disminuyendo de manera significativa al disminuir la densidad (hasta $434 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Mientras que la E2 presentó un comportamiento opuesto, siendo el rtoPR mayor en la DB reduciendo su valor de manera significativa al pasar a la DA (120 y $38 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente) (tabla 3).

Respecto al híbrido, el rtoPR de la E1 del H 481 fue superior al rtoPR de la E1 del H 470, logrando valores de 702 y $582 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente (tabla 4). Sin embargo, el rtoPR de la E2 fue menor al de la E1, pero sin diferencias entre H ($81 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ promedio, tabla 5).

Se observó mismo comportamiento para el rendimiento de almidón (rtoALM) en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, con $p < 0,001$ para D*E y $p < 0,01$ para H*E. Se obtuvo un valor de $7056 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la E1 DA disminuyendo hasta $3712 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la DB. En cuanto a la E2, el mayor rtoALM se logró en la DB con $1066 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y disminuyó hasta $320 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la DA (tabla 3).

Respecto al híbrido, el rtoALM de la E1 del H 481 fue superior al H 470, con valores de 5904 y $5017 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectivamente (tabla 4). Mientras, que el rtoALM de la E2, si bien fue menor al de la E1, no se observaron diferencias entre H, logrando un valor promedio de $700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (tabla 5).

Plasticidad Fenotípica (tabla 6)

Tabla 6. Variación (%) al pasar de alta densidad de plantas (8 pl.m⁻²) a media (6 pl.m⁻²) y baja (4 pl.m⁻²) densidad para aquellas variables en que la densidad resultó significativa (p<0,05), particionando por espiga (E1 y E2).

Variables	Espiga	Densidad (pl.m ⁻²)						Variación (%)	
		8		6		4		8 a 6 pl.m ⁻²	8 a 4 pl.m ⁻²
Rto (kg.ha ⁻¹)	1	9897	a	8069	b	5201	c	-19%	-47%
	2	454	b	1009	ab	1498	a	123%	230%
NG.m ⁻²	1	3341	a	2778	b	2113	c	-17%	-37%
	2	162	b	341	ab	542	a	111%	236%
NE.m ⁻²	1	7,8	a	5,9	b	4,0	c	-24%	-49%
	2	0,7	b	1,8	a	2,6	a	157%	264%
NGE	1	434	b	473	ab	537	a	9%	24%
	2	155	a	204	a	208	a	32%	34%
RtoPR	1	830	a	678	b	434	c	-18%	-48%
	2	38	b	86	ab	120	a	126%	216%
RtoALM	1	7057	a	5733	b	3712	c	-19%	-47%
	2	320	b	717	ab	1066	a	124%	233%
IAF		3,3	a	2,5	b	1,5	c	-24%	-55%

Letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre medias. +: aumenta. -: disminuye.

Se observó un comportamiento distinto entre espigas para las diferentes variables en estudio ante el cambio en la densidad de plantas. El rto de la E1 se vio reducido en un 19 y 47% al pasar de una densidad de 8 pl.m⁻² a una de 6 y 4 pl.m⁻², respectivamente. Mientras que el rto de la E2 sufrió un aumento importante (230%) al pasar de la DA a la DB.

Estos comportamientos pueden explicarse a través del NG.m⁻² y el NE.m⁻². El NG.m⁻², principal variable que explica el rto, de la E1 se vio reducido en un 17 y 37% al pasar de la DA a la DM y DB respectivamente. Mientras que en la E2 dicha variable aumentó un 236% al pasar de 8 a 4 pl.m⁻². En cuanto al NE1.m⁻², se redujo un 24 y 49% al pasar de DA a DM, y de DA a DB, respectivamente. Sin embargo, NE2.m⁻² incrementó al disminuir la densidad.

Al mirar el NGE1, este componente tuvo un comportamiento distinto al de las variables previamente mencionadas. Al disminuir la densidad de siembra de 8 a 4 pl.m⁻², el NGE1 aumentó un 24%. Mientras que el NGE2 no mostró cambios significativos.

En cuanto a los rendimientos de proteína y almidón (rtoPR y rtoALM) por unidad de superficie, ambos componentes mostraron un comportamiento similar: el rtoPR y rtoALM de la E1 disminuyeron al pasar de DA a DB en un 48 y 47%, respectivamente. Contrario a esto, la E2 presentó un incremento de ambas variables de un 216 y 233%, respectivamente, al pasar de DA a DB.

Por otro lado, el IAF sufrió reducciones significativas al disminuir la densidad de siembra, pasando de 3,3 con DA a 2,5 en DM hasta 1,5 en DB (tabla 1). Dichas variaciones fueron de un 24% al pasar de 8 a 6 pl.m⁻² y de un 55% al pasar de 8 a 4 pl.m⁻².

Correlaciones (tabla 7)

Tabla 7. Correlaciones entre las variables en estudio particionado por espiga.

Espiga 1	PR (%)	ALM (%)	PH (kg.hl ⁻¹)	PG (mg)	NGE	NG.m ⁻²	Rto (kg.ha ⁻¹)	IAF	Spad
PR (%)	1	-0,27	-0,05	0,49*	-0,20	0,02	0,22	0,20	-0,15
ALM (%)		1	-0,31	-0,16	0,03	-0,19	-0,24	-0,15	-0,05
PH (kg.hl ⁻¹)			1	-0,14	-0,08	0,31	0,23	0,27	0,27
PG (mg)				1	-0,13	-0,24	0,08	-0,03	0,02
NGE					1	-0,30	-0,55*	-0,56*	0,04
NG.m ⁻²						1	0,90***	0,92***	-0,14
Rto (kg.ha ⁻¹)							1	0,95***	-0,24
IAF								1	-0,11
									1

Espiga 2	PR (%)	ALM (%)	PH (kg.hl ⁻¹)	PG (mg)	NGE	NG.m ⁻²	Rto (kg.ha ⁻¹)	IAF	Spad
PR (%)	1	-0,09	0,15	0,86***	-0,36	-0,51	-0,40	0,42	-0,10
ALM (%)		1	-0,55*	-0,30	-0,39	0,04	-0,03	-0,27	-0,25
PH (kg.hl ⁻¹)			1	0,26	0,47	0,10	0,12	0,25	0,22
PG (mg)				1	-0,18	-0,28	-0,13	0,31	0,04
NGE					1	0,59*	0,60*	-0,21	0,16
NG.m ⁻²						1	0,99***	-0,55*	0,32
Rto (kg.ha ⁻¹)							1	-0,52*	0,33
IAF								1	-0,11
									1

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

El contenido de PR y el PG estuvieron positivamente correlacionados, lo que indica que al aumentar o disminuir uno de ellos, el otro también aumenta o disminuye. Esta correlación fue mayor en la E2 (0,86 y $p < 0,001$) que en la E1 (0,49 y $p < 0,05$) (figura 3a).

El rto se correlacionó positivamente con el NG.m⁻² en ambas espigas ($p < 0,001$), mientras que su correlación con el NGE fue diferente para cada espiga: el rto se correlacionó negativamente con el NGE en la E1 ($p < 0,05$), mientras que dicha correlación en la E2 fue positiva ($p < 0,05$) (figura 3b).

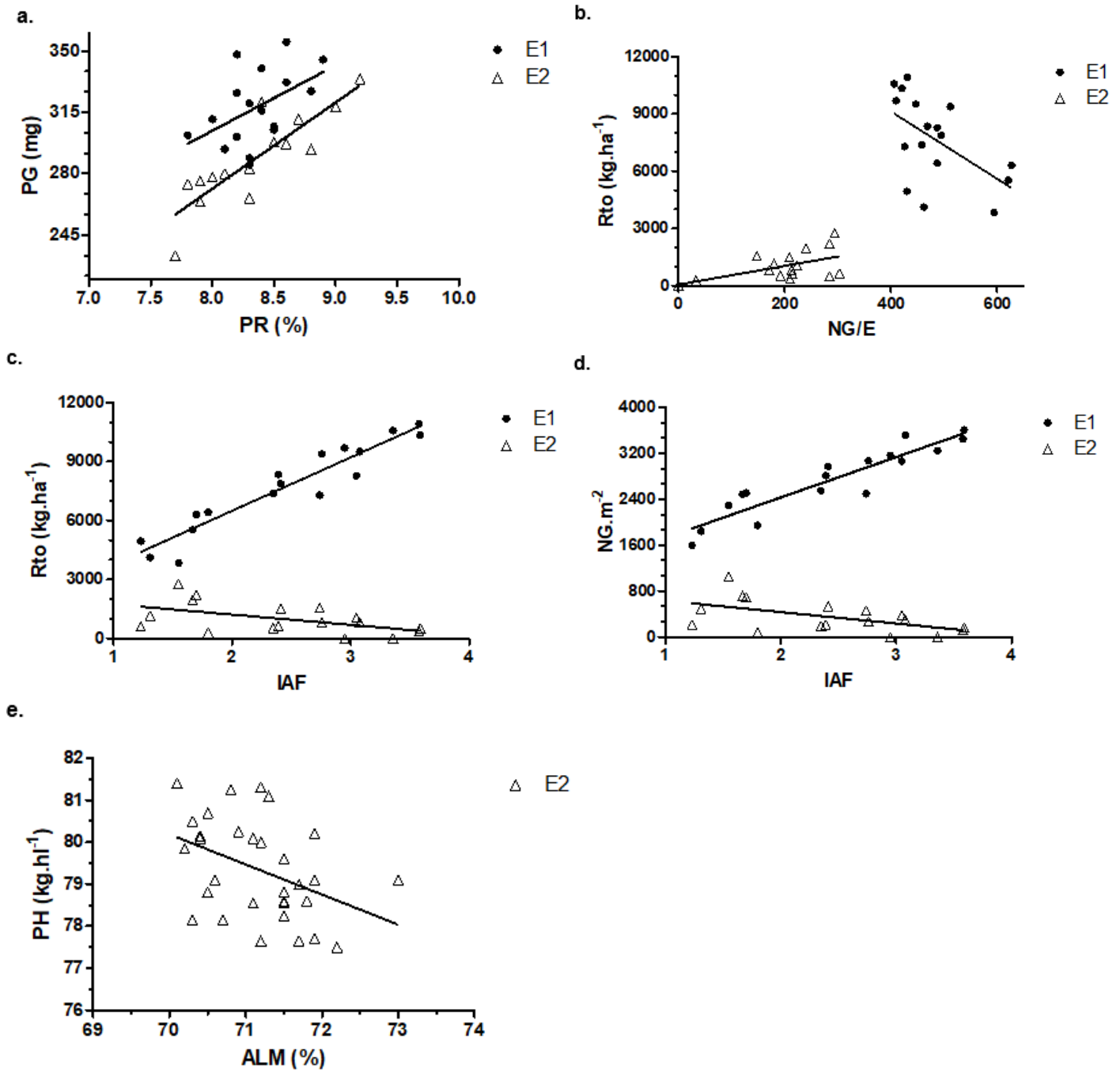
Por otro lado, el NGE y el NG.m⁻² estuvieron positivamente correlacionados únicamente en la E2 ($p < 0,05$).

El IAF presentó correlación con el rto y el NG.m⁻², pero dicha correlación fue mayor y positiva en la E1 ($p < 0,001$ y $p < 0,001$ respectivamente) y menor y negativa en la E2 ($p < 0,05$

y $p < 0,05$ respectivamente) (figura 3c y d). En la E1 también existió correlación negativa entre IAF y NGE ($p < 0,05$).

Por último, el PH se correlacionó negativamente con el contenido de ALM en la E2 ($-0,55$ y $p < 0,05$) (figura 3e).

Figura 3. Correlaciones particionado por espiga: (a) entre el contenido de proteína (PR) y el peso de los granos (PG), (b) entre el rendimiento (rto) y el número de granos por espiga (NGE), (c) entre el rto y el índice de área foliar (IAF), (d) entre el número de granos por metro cuadrado (NG.m²) y el IAF, y (e) entre el peso hectolítrico (PH) y el contenido de almidón (ALM).



Discusión

Al disminuir la densidad de siembra de DA a DM y DB, aumentó el $NE.pl^{-1}$ (mayor prolificidad), es decir, hubo mayor fijación de espigas sub apicales (mayor NE2). Esto se debe a que, cuando se siembra a densidades altas ($8 pl.m^{-2}$), hay una menor tasa de crecimiento por planta durante el PC para la fijación de granos (Andrade et al., 1999), lo que resulta en la no fijación de segundas espigas o en la fijación de E2 de menor tamaño (menor NG). En estas condiciones, el NG de la E1 es quien determina principalmente el rto por unidad de superficie.

En cambio, cuando se siembra el maíz a bajas densidades (6 y $4 pl.m^{-2}$), la tasa de crecimiento por planta es mayor, resultando en la fijación de E2, de mayor tamaño (mayor NG) y, por lo tanto, con mayor contribución al rto (Otegui, 1995).

Si bien tanto el $rtoE2$, el $NGE2.m^{-2}$ y el $NE2.m^{-2}$ aumentaron al reducirse la densidad de siembra (de 8 a 6 y $4 pl.m^{-2}$), el rto del cultivo ($kg.ha^{-1}$) fue menor. Esto se debe a que hubo un menor $NG.m^{-2}$ y menor $NE.m^{-2}$, y el rto está fuerte y positivamente asociado al $NG.m^{-2}$.

Por otro lado, Ciancio et al. (2016) observaron diferencias en el NGE entre densidades, logrando mayor NG en ambas espigas al disminuir la densidad de siembra. En este experimento también se observaron diferencias significativas en el NGE entre densidades, pero únicamente en la E1, aumentando el NG al disminuir la densidad.

Respecto al PG, el mismo se mantuvo constante entre densidades en concordancia con Andrade y Sadras (2000) quienes observaron que el componente de rto más afectado por el cambio en la densidad es el NG, mientras que el PG presenta mayor estabilidad. Sin embargo, el PG difirió entre genotipos.

En cuanto a la calidad del grano, no se obtuvieron diferencias significativas en el contenido de proteína (%) y almidón (%) de los granos entre densidades, coincidiendo con lo reportado por Younis et al. (2021). Sin embargo, Tamagno et al. (2016) reportaron un incremento en el contenido de proteína de los granos al disminuir la densidad de siembra, pero sin efecto en la concentración de almidón. A su vez, en ambos trabajos se obtuvo un mayor PG al reducirse la densidad de plantas, mientras que en este experimento no se observó lo mismo ($p=0,1840$). Por otro lado, Borrás et al. (2003) también afirman que reducciones en la densidad de siembra incrementan el contenido de proteína en grano.

Si bien la concentración de PR en grano y el PG no tuvieron variaciones entre densidades, se pudo ver que existió una correlación positiva entre estas dos variables, y que dicha correlación fue más fuerte en la E2 que en la E1. A su vez, estas dos variables (PR y PG)

fueron las únicas que presentaron diferencias significativas entre genotipos, lo que indica que, a pesar de que los dos híbridos tuvieron igual nivel de rendimiento, existen diferencias en cómo es la composición del grano.

Dichas diferencias observadas en la concentración de proteínas (%) en grano entre genotipos, a pesar de que ambos son semi dentados, también fueron observadas por Borrás (2016), quien encontró que existían diferencias importantes en proteína en grano entre genotipos flint. A la misma conclusión llegaron Tamango et al. (2016) en sus experimentos.

Al estudiar el rendimiento de proteína y almidón por hectárea ($\text{rto kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), sí se obtuvieron diferencias significativas entre densidades. Lo mismo fue reportado por Younis et al. (2021). Ambos componentes disminuyeron al disminuir la densidad de siembra en un 12% y 27% (rtoPR y rtoALM , respectivamente) al pasar de 8 a 6 $\text{pl}\cdot\text{m}^{-2}$, y en un 36% y 46% al pasar de 8 a 4 $\text{pl}\cdot\text{m}^{-2}$.

Esta disminución en el rtoPR y el rtoALM al reducir la densidad de siembra es debida, principalmente, al menor rto ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) del cultivo obtenido, ya que los contenidos de proteína y almidón (%) en grano no sufrieron diferencias al pasar de una densidad de plantas a otra. A esta misma conclusión llegaron Younis et al. (2021).

Por otro lado, al mirar el peso hectolítrico, no hubo cambios entre densidades, espigas ni genotipos. Sin embargo, Borrás (2016) asegura que una disminución en la densidad de siembra permite asegurar un mayor PH. Esto mismo fue reportado por Tamango et al. (2016) quienes obtuvieron un mayor PH al reducirse la densidad. Además, encontraron que el PH variaba entre tipos de granos (por ejemplo, flint y dentado) y entre genotipos dentro del tipo de grano (por ejemplo, dentado).

En este ensayo se observó que el PH presentó una correlación negativa con el contenido de ALM en la E2. Scrob et al. (2014) también obtuvieron en sus ensayos una correlación negativa entre dichas variables, pero únicamente en uno de los dos años del experimento. Además obtuvieron correlación negativa entre contenido de ALM y de PR, algo que en este ensayo no se observó.

De todas las variables estudiadas, el rto ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), el $\text{NG}\cdot\text{m}^{-2}$, el $\text{NE}\cdot\text{m}^{-2}$, el rtoPR ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el rtoALM ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) presentaron interacción D^*E , siendo siempre mayores los valores de la E1 que la E2. La E1 tuvo los valores más altos en la DA, disminuyendo los mismos al reducirse la densidad. Mientras que la E2 presentó el comportamiento opuesto, mayores valores en la DB y disminuyendo al elevarse la densidad.

A pesar de que los dos híbridos utilizados eran del mismo tipo de grano, semidentados, hubo diferencias entre ellos en rto ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), PR (%), rtoPR ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y rtoALM ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

En cuanto al IAF, este disminuye al reducirse la densidad de siembra dado el menor número de plantas por unidad de superficie. Un menor IAF lleva a una menor eficiencia de interceptación de la radiación (no se llega al IAF crítico) y, por lo tanto, se obtiene un menor rto. Sin embargo, esta relación no fue igual para los rto de las E1 y E2. En la E1, el IAF y el rto (y, por lo tanto, también el $\text{NG}\cdot\text{m}^{-2}$) se correlacionan positivamente, mientras que en la E2 dicha correlación es negativa. Esto tiene que ver con el efecto de sombreo que ocurre con los altos IAF que se obtienen a densidades de siembra altas (Russell, 1968). La reducción de la interceptación de la luz limita la capacidad de la fuente, lo que puede retardar el crecimiento de la E2 o inhibirla (Tetio-Khago & Gardner, 1988). Como consecuencia de esto, y en concordancia con lo obtenido en este ensayo, la prolificidad a densidad de siembra alta es menor que la obtenida con densidades más bajas, siendo también menor el rto de la E2.

Conclusiones

Los granos no mostraron diferencias de calidad (PR, ALM, PH) entre la espiga apical y basal. Tampoco se vio afectada la calidad de los mismos al modificarse la densidad de siembra. Para ambos híbridos se encontraron diferencias entre el peso de los granos de la espiga apical y basal, siendo mayor el peso de los granos de la espiga 1.

Por otro lado, los componentes numéricos del rendimiento fueron distintos para la espiga apical y basal, y se vieron afectados al modificar la densidad de siembra.

Sin embargo, si bien los híbridos utilizados eran ambos semidentados (mismo tipo de grano), se vieron diferencias en calidad (en PR) entre ellos. Esto indicaría que la calidad de los granos está más determinada por el genotipo que por el ambiente. Por lo tanto, es importante tener en cuenta tanto la densidad como el genotipo al momento de sembrar ya que esto va a influir tanto en el rendimiento final como en la calidad de grano lograda.

Bibliografía

- Aguirrezábal, L. A. & Andrade, F. H. (1998). *Calidad de productos agrícolas: bases ecofisiológicas, genéticas y de manejo agronómico*. Balcarce, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce.
- Alexander, D. E. (1998). *Breeding special nutritional and industrial types*. Agronomy monograph N° 18, 869-880.
- Al-Naggar, A. M. M., Atta, M. M. M., Ahmed, M. A. & Younis, A. S. M. (2016). Genotypic differences in grain protein, oil and starch content and yield of maize (*Zea mays* L.) under elevated plant density. *Asian Research Journal of Agriculture*, 1: 1-18.
- 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.
- Aramburu Merlos, F., 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.
- Bolsa de Cereales. (2021). Obtenido de Bolsa de Cereales: <https://www.bolsadecereales.com/>
- Borrás, L. & Otegui, M. E. (2001). Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. *Crop Science*, 41: 1816-1823.
- Borrás, L., Maddonni, G. A. & Otegui, M. E. (2003). Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kernel set effects. *Field Crops Research*, 82: 13-26.
- Borrás, L. (2016). *Diferencias en rinde y calidad de grano entre genotipos flint (Colorado duro) en fechas de siembra contrastantes en el centro de Argentina*. Facultad de Ciencias Agrarias, UNR.

- 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. (1996). Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*, 36: 325-331.
- Cox, W. J. (1996). Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. *Agronomy Journal*, 88: 489-496.
- 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.
- Eyhéabide, G., Borrás, F., Percilbaldi, M., Farroni, A., Robutti, J., Di Martino, A., Presello, D. & Lorea, R. (2007, Septiembre). Physical and biochemical grain quality characterization in maize cultivars from Argentina. *First Latinoamerican Conference of ICC*. Rosario.
- FAO. (2019). Obtenido de faostat: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL/visualize>
- 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.
- Giménez, L. (2010). *Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja*. Uruguay: Facultad de Agronomía de la Universidad de la República.
- Jones, R. J., Shreiber, B. M. N. & Roessler, J. A. (1996). Kernel sink capacity in maize: genotypic and maternal regulation. *Crop Science*, 36: 301-306.
- Kiniry, J. R., Ritchie, J. T., Musser, R. L., Flint, E. P. & Iwig, W. C. (1983). The photoperiod sensitive interval in maize. *Agronomy Journal*, 75: 687-690.
- MacDonald, N. W., Zak, D. R., & Pregitzer, K. S. (1995). Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 233-240.
- Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology* 107: 325-345.

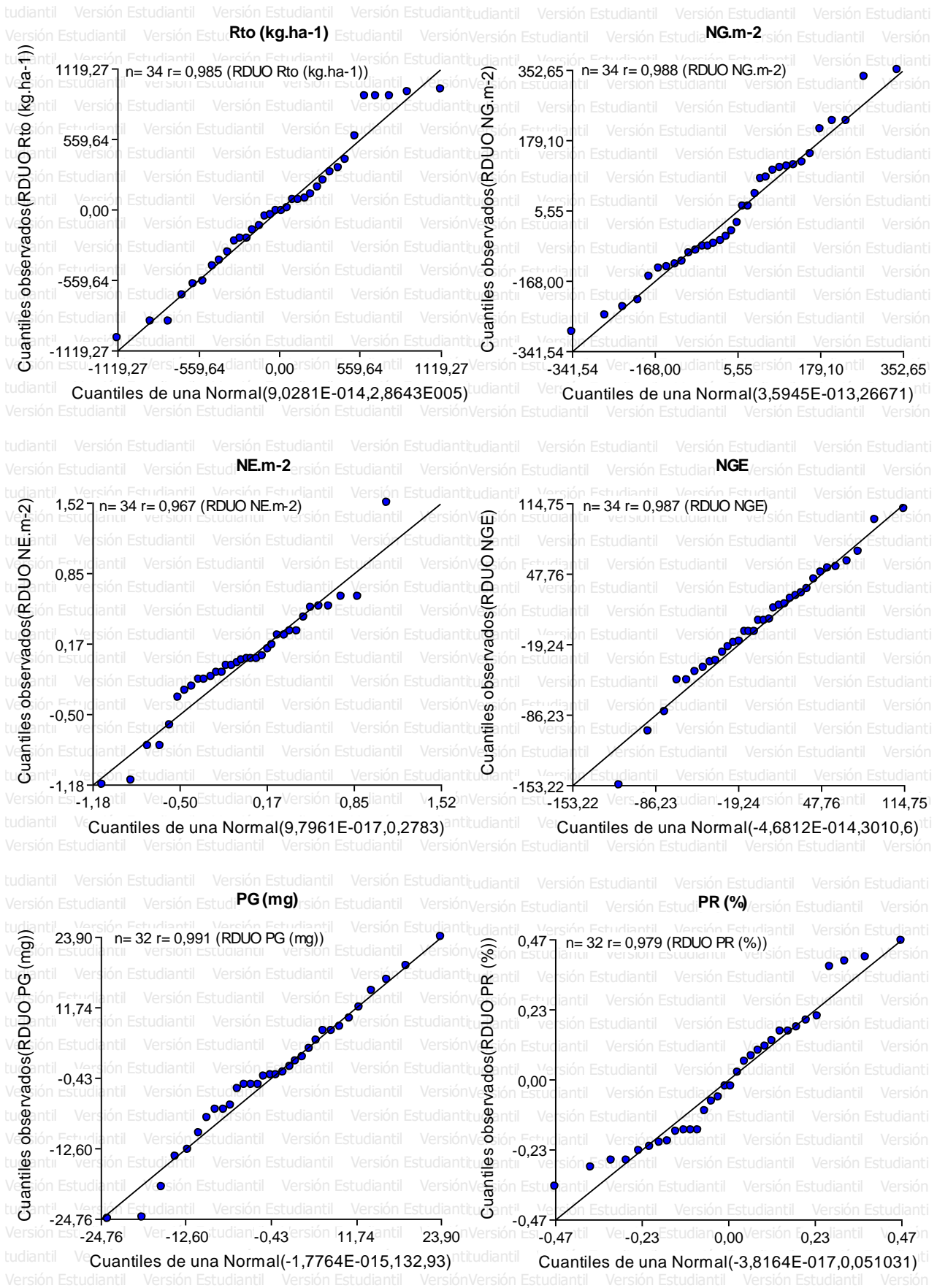
- Maddonni, G. A. & Otegui, M. E. (1996). Leaf area, light interception and crop development in maize. *Field Crops Research*, 48: 81-87.
- Magson, J. (1997). Toward drought tolerant maize in South Africa. *Proceedings of a symposium*, 455-459. El Batán, México: CIMMYT.
- MAGyP. (2021, septiembre). Obtenido de Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca: <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>
- Maisch, W. (1987). Fermentation. En S. A. Watson & P. E. Ramstad, eds. *Corn: Chemistry and Technology*. St. Paul, Minnesota, USA: AACC.
- Menéndez, J. E. & Hilbert, J. A. (2013). Caracterización de la Región Zona Núcleo Norte. En *Cuantificación y uso de biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía* (pp. 13-15). INTA.
- Monteith, J. L. (1977). Climate. En P. T. Alvim & T. T. (eds.), *Ecophysiology of tropical crops* (pp. 1-27). New York, USA: Academic Press.
- Moreno-Sotomayor, A., Weiss, A., Papparozzi, E. T. & Arkebauer, T. J. (2002). Stability of leaf anatomy and light response curves of field grown maize as a function of age and nitrogen status. *Journal of Plant Physiology*, 159: 819-826.
- Otegui, M. E. (1995). Prolificacy and grain yield components in modern Argentinian maize hybrids. *Maydica*, 40: 371-376.
- Otegui, M. E., Cirilo, A. G., Maddonni G. A. & Cárcova, J. (2000). Fenología y composición del rendimiento en cinc híbridos de maíz. Informe de circulación restringida. Convenio Cátedra de Cereales-Nidera S. A. 15 pp.
- Pan, W. L., Camberato, J. J., Moll, R. H., Kamprath, E. J. & Jackson, W. A. (1995). Altering source-sink relationships in prolific maize hybrids: consequences for nitrogen uptake and remobilization. *Crop Science*, 35: 836-845.
- Pan, W. L., Kamprath, E. J., Moll, R. H. & Jackson, W. A. (1984). Prolificacy in corn: its effects on nitrate and ammonium uptake and utilization. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 1101-1106.
- 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. *Field Crops Research*, 225-105761.

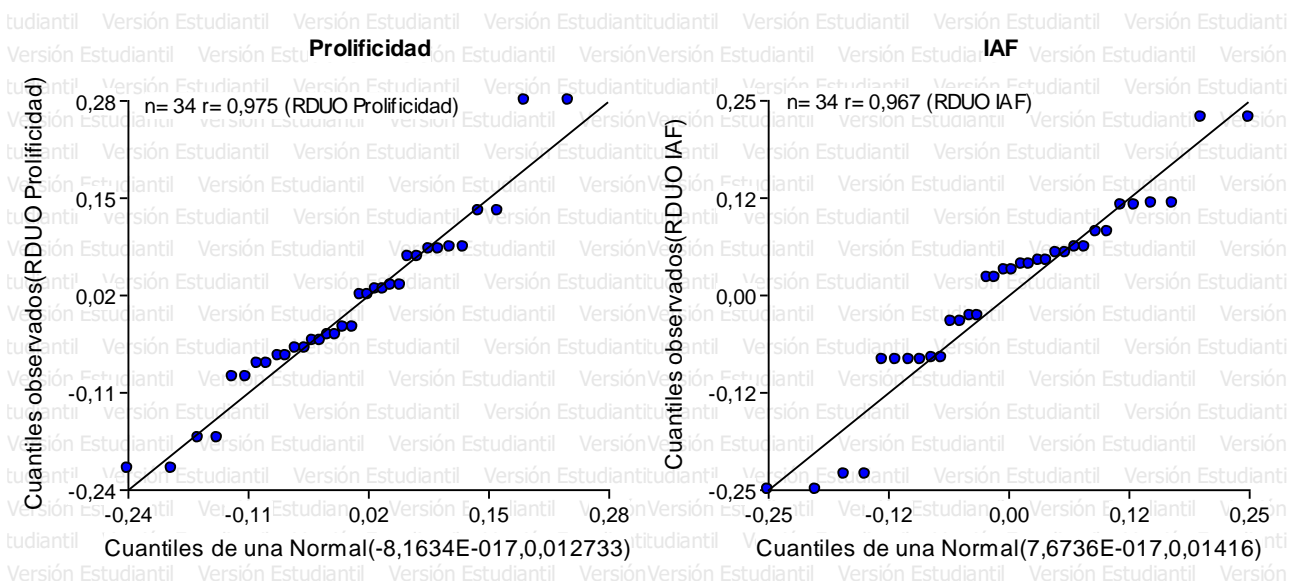
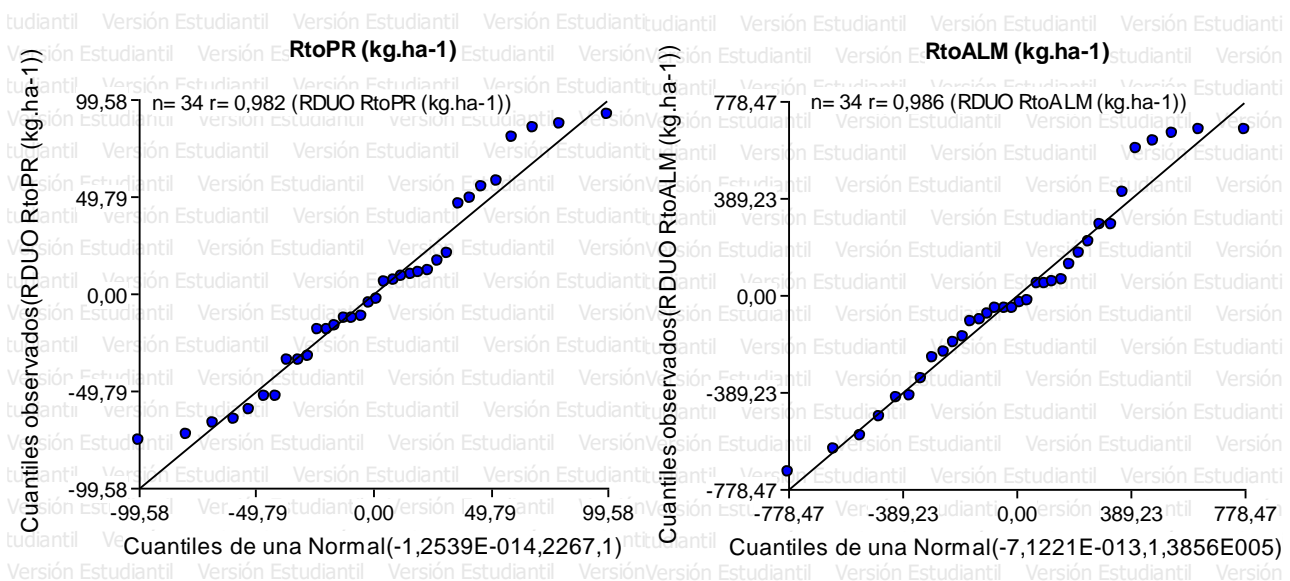
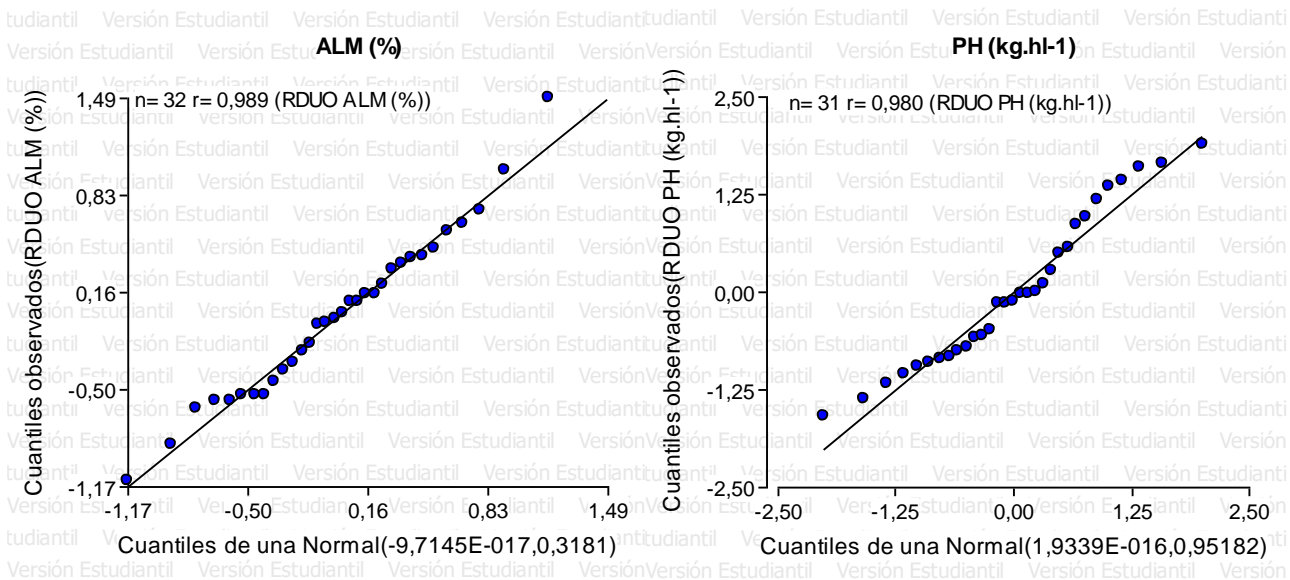
- Russell, W. A. (1968). Test crosses of one- or two-ear types of corn belt maize inbreeds: I. Performance at four stand plant densities. *Crop Science*, 8: 244-247.
- Sadras, V., Ferreiro, M., Gutheim, F. & Kantolic, A. G. (2000). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En F. H. Andrade & V. O. Sadras, eds. *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja* (pp. 29-60). Argentina: Editorial Médica Panamericana.
- 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. (1988). The competitive ability of spring cereals. PhD Thesis, Univeristy of Reading. UK.
- Satorre, E. H. (1999). Plant density and distribution as modifiers of growth and yield. En E. H. Satorre & G. A. Slafer, eds. *Wheat: Ecology and Physiology of yield determination*. (pp. 141-159). New York: The Haworth Press, Inc.
- Scrob, S., Muste, S., Has, I. Muresan, C., Socaci, S. & Farcas, A. (2014). The biochemical composition and correlation estimates for grain quality in Maize. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 20(2): 150-155.
- Tamagno, S., Greco, I. A., Almeida, H., Paola, J. C., Ribes, F. M. & Borrás, L. (2016). Crop management options for maximizing maize kernel hardness. *Agronomy Journal*, 108: 1561-1570.
- Tetio-Khago, F. & Gardner, F. P. (1998). Responses of maize to plant population density: II. Reproductive development and yield adjustments. *Agronomy Journal*, 80: 935-940.
- Thompson, L. M. (1986). Climatic change, weather variability and corn production. *Agronomy Journal*, 78: 649-653.
- Tsai, C. Y., Huber, D. M & Warren, H. L. (1978). Relationship of the kernel sink for N to maize productivity. *Crop Science*, 18: 399-404.
- Uribelarrea, M., Crafts-Brandner, S. & Below F. (2009). Physiological N response of field-grown maize hybrids (*Zea mays* L.) with divergent yield potential and grain protein concentration. *Plant Soil*, 316:151–160.
- Vega, C. R. & Andrade, F. H. (2000). Densidad de plantas y espaciamento 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.

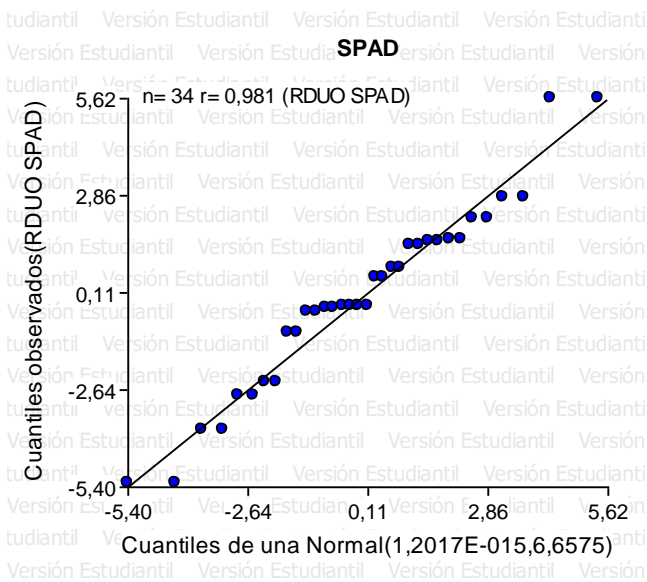
- Watson, S. A. (1988). Corn marketing, processing and utilization. En G. F. Sprague & J. W. Dudley, eds. *Corn and corn improvement* (pp. 882-940). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy.
- Watson, S. A. & Ramstad, P. E. (1987). *Chemistry and Technology*. Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists.
- Younis, A. S. M., Al-Naggar, A. M. M., Bakry, B. A. & Nassar, S. M. A. (2021). Maximizing maize grain, protein, oil and starch yields by using high plant density and stress tolerant genotype. *Asian Journal of Plant Sciences*, 20: 91-101.

Anexos

Normalidad:







Homogeneidad de varianzas:

