

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EFEECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA SOBRE LA MORFOLOGÍA Y EL
RENDIMIENTO DEL HÍBRIDO DE MAÍZ DK478 PARA GRANO SECO**

POR

EDUARDO IGNACIO FUENTES VÁSQUEZ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLAN-CHILE

2025

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFEECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA SOBRE LA MORFOLOGÍA Y EL
RENDIMIENTO DEL HÍBRIDO DE MAÍZ DK478 PARA GRANO SECO**

POR

EDUARDO IGNACIO FUENTES VÁSQUEZ

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILE
2025

Aprobada por:

Profesor Asistente, Abdelhalim Khaled E.

Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Guía

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.

Biólogo, Dr. Cs.

Asesor

Investigadora Asociada, Dalma Castillo G.

Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.

Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y métodos.....	6
Resultados y discusión.....	9
Conclusiones	17
Referencias	18
Apéndices.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Esquema del ensayo en la estación experimental de Camino Penco.....	8
Figura 2 Efecto de la densidad de siembra sobre la biomasa y los componentes del rendimiento	12
Figura 3 Efecto de la densidad de siembra sobre la morfología	14
Figura 4 Efecto de la densidad de siembra sobre el contenido de clorofila.....	17
Tabla 1 Datos climáticos durante el ciclo de cultivo (2022-2023)	7

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA SOBRE LA MORFOLOGÍA Y EL RENDIMIENTO DEL HÍBRIDO DE MAÍZ DK478 PARA GRANO SECO

EFFECT OF PLANTING DENSITY ON THE MORPHOLOGY AND YIELD OF THE DK478 MAIZE HYBRID FOR DRY GRAIN

Palabras clave: Densidad de siembra, eficiencia en el uso de recursos, plasticidad morfofisiología, rendimiento de granos, *Zea mays*.

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo de alta relevancia estratégica en Chile, donde constituye la base de la alimentación animal y un insumo clave en la agroindustria. La densidad de siembra es un factor determinante en la productividad, ya que regula la competencia intraespecífica y la eficiencia en el uso de recursos. El presente estudio evaluó el efecto de dos densidades de siembra ($D1 = 133.350$ plantas ha^{-1} y $D2 = 66.650$ plantas ha^{-1}) sobre la morfología y el rendimiento del híbrido de maíz DK478, bajo un diseño de bloques completos. Se registraron parámetros morfológicos (altura de planta, diámetro de tallo, área foliar de la hoja de mazorca, número de hojas y ángulo foliar), fisiológicos (contenido de clorofila) y productivos (biomasa aérea, rendimiento de grano, número de granos por mazorca y peso de 100 granos). La D1 incrementó significativamente la biomasa (≈ 55 t ha^{-1}) y el rendimiento de grano (≈ 19 t ha^{-1}), en comparación con la D2 (≈ 42 t ha^{-1} y 14 t ha^{-1} , respectivamente). Sin embargo, a menor densidad se favorecieron características individuales como mayor diámetro de tallo, mayor peso de 100 granos, mayor área foliar de la hoja de mazorca por planta y mayor acumulación de clorofila. En conclusión, el híbrido DK478 mostró elevada plasticidad morfofisiológica y respondió favorablemente a la alta densidad, lo que confirma su potencial en sistemas intensivos de producción de grano seco.

SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) is a crop of high strategic relevance in Chile, serving as the basis for animal feed and a key input for the agro-industrial sector. Planting density is a determining factor in productivity, as it regulates intraspecific competition and

resource-use efficiency. This study evaluated the effect of two planting densities (D1 = 133.350 plants ha⁻¹ and D2 = 66.650 plants ha⁻¹) on the morphology and yield of the maize hybrid DK478, under a complete block design. Morphological parameters (plant height, stem diameter, leaf area of the ear leaf, number of leaves, and leaf angle), physiological traits (chlorophyll content), and productive variables (aboveground biomass, grain yield, number of kernels per ear, and 100-kernel weight) were recorded. D1 significantly increased biomass ($\approx 55 \text{ t ha}^{-1}$) and grain yield ($\approx 19 \text{ t ha}^{-1}$) compared to D2 ($\approx 42 \text{ t ha}^{-1}$ and 14 t ha^{-1} , respectively). However, lower density favored individual traits such as greater stem diameter, higher 100-kernel weight, larger ear leaf area per plant, and higher chlorophyll accumulation. In conclusion, the DK478 hybrid exhibited high morphophysiological plasticity and responded favorably to high density, confirming its potential in intensive dry grain production systems.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos de mayor relevancia a nivel mundial y constituye un pilar de la agricultura contemporánea. En términos de producción, supera ampliamente al trigo y al arroz, consolidándose como el cereal más cosechado en el planeta. Según la Alonso-Sánchez *et al.* (2023), representa alrededor del 40 % de la producción global de granos, lo que refleja su importancia no solo como alimento, sino también como insumo esencial en diversos sectores productivos. Durante el año 2021, la producción mundial de maíz alcanzó aproximadamente 1.200 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de $5,9 \text{ t ha}^{-1}$ (Aghaei *et al.*, 2022). Cifras que evidencian su capacidad de adaptación a distintas condiciones agroecológicas y al progreso tecnológico en su manejo.

Los mayores productores del mundo son Estados Unidos, China, Brasil, Argentina y Ucrania, quienes concentran más del 70 % de la oferta global. Estados Unidos lidera con más de 380 millones de toneladas, seguido de China con alrededor de 270 millones y Brasil con una producción que ha superado en la última década los 120 millones de toneladas (Aghaei *et al.*, 2022). Estos países cumplen un papel decisivo en la seguridad alimentaria mundial, ya que además de satisfacer sus demandas internas, abastecen gran parte del comercio internacional, donde

Argentina y Ucrania destacan como exportadores estratégicos.

Más allá de su valor económico, el maíz representa un alimento cultural y social de enorme trascendencia. En África, constituye la base alimentaria de millones de personas, aportando más del 50 % de la ingesta calórica diaria (Israel *et al.*, 2018), mientras que en América Latina se mantiene como un alimento identitario, presente en preparaciones tradicionales que refuerzan su carácter patrimonial. Esta versatilidad, sumada a la creciente demanda, plantea el desafío de avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles y eficientes frente a la presión del cambio climático.

El origen del maíz se remonta a Mesoamérica, donde fue domesticado hace cerca de 9.000 años a partir del teosinte. Este acontecimiento marcó un hito en la historia agrícola, ya que permitió el desarrollo de civilizaciones como la maya y la azteca, cuya subsistencia dependía en gran medida de este cereal Quimbo y De la Torre Parra (2024). Tras la llegada de los europeos al continente, el cultivo se expandió rápidamente hacia Europa, África y Asia durante los siglos XVI y XVII, logrando consolidarse como un cultivo de alcance global en pocas décadas debido a su extraordinaria capacidad de adaptación.

A lo largo de la historia, el maíz no solo ha sido un alimento, sino también un símbolo cultural y espiritual. Diversas comunidades indígenas lo han incorporado en rituales, tradiciones y sistemas de organización agrícola, manteniéndolo como eje fundamental de su identidad cultural Elizondo y Boschini (2001). La posterior incorporación de prácticas de mejoramiento genético permitió elevar considerablemente su productividad. Las primeras técnicas de selección, seguidas por la introducción de híbridos en el siglo XX, marcaron el inicio de una revolución agrícola basada en el vigor híbrido o heterosis, con la que se multiplicaron los rendimientos y se ampliaron los rangos de adaptación del cultivo.

En la actualidad, los avances en la mejora genética han potenciado la creación de híbridos y variedades transgénicas con resistencia a plagas y tolerancia al estrés hídrico lo que ha permitido sostener la producción frente a un contexto de creciente variabilidad climática (Quimbo y de la Torre Parra, 2024). Estas innovaciones refuerzan el papel estratégico del maíz como un cultivo clave en la seguridad

alimentaria global.

En Chile, el maíz ocupa una posición prioritaria dentro de los cultivos anuales, junto al trigo y la avena. Para la temporada agrícola 2024-2025, la superficie sembrada alcanzó las 46.268 hectáreas (INE, 2025), mostrando una ligera disminución respecto a años anteriores debido a la competencia con cultivos de mayor rentabilidad y a la dependencia creciente de importaciones. No obstante, se mantiene como un cultivo de relevancia estratégica, al sostener la industria pecuaria nacional y reducir la vulnerabilidad frente a la dependencia externa.

La producción se concentra principalmente en la zona centro-sur, en regiones como O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío, donde las condiciones edafoclimáticas son más favorables. Estas áreas presentan suelos fértiles y disponibilidad hídrica que permiten alcanzar rendimientos competitivos a nivel internacional, aunque los fenómenos climáticos extremos de los últimos años han afectado la estabilidad de la producción. La mayor parte del maíz nacional, más del 80 % se destina a la elaboración de alimentos balanceados para aves, cerdos y bovinos, mientras que una fracción menor se orienta al consumo humano en forma de mote, harinas y productos procesados (INE, 2025).

El Estudio de Intenciones de Siembra (INE, 2025) proyecta que la superficie dedicada a este cultivo tenderá a una leve reducción, aunque seguirá siendo un insumo estratégico en la cadena agropecuaria. En este sentido, el maíz en Chile no solo contribuye a la seguridad alimentaria, sino que también cumple un rol económico al generar empleo e ingresos en zonas rurales. Optimizar su productividad mediante prácticas agronómicas sostenibles es, por tanto, una prioridad para la agricultura nacional.

Desde el punto de vista nutricional, el maíz se caracteriza por su elevado contenido de carbohidratos, principalmente almidón, que representan entre el 60 % y el 70 % de su peso seco. Este aporte energético resulta esencial en la alimentación humana y animal. Asimismo, contiene entre 8 % y 11 % de proteínas, aunque limitadas en lisina y triptófano, lo que exige complementarlas con otras fuentes proteicas en la dieta (Kgasago y Reinhardt, 2006). Aporta además lípidos en proporciones moderadas, minerales como fósforo, potasio y magnesio, y

vitaminas del complejo B, reforzando su valor nutricional.

En la alimentación animal, el maíz ocupa un lugar irremplazable como ingrediente principal de balanceados, especialmente en aves y cerdos, debido a su elevada digestibilidad y eficiencia energética (Trnka *et al.*, 2024). En el ámbito humano, mantiene un fuerte vínculo cultural en América Latina, donde constituye la base de preparaciones tradicionales como tortillas, arepas y tamales, al mismo tiempo que es utilizado industrialmente en la elaboración de harinas precocidas, aceites, confitería y bebidas fermentadas. Además, los subproductos del cultivo, como hojas, tallos y olores, se aprovechan en la alimentación animal en forma de forraje o ensilaje, aumentando la eficiencia del sistema productivo.

A pesar de estas ventajas, la producción de maíz enfrenta desafíos significativos. El cambio climático ha incrementado la frecuencia de sequías, olas de calor e irregularidades en la precipitación, lo que afecta la estabilidad de los rendimientos. Paralelamente, la intensificación agrícola ha favorecido la aparición de plagas y enfermedades, mientras que el uso intensivo de los suelos conduce a su degradación progresiva (Alonso-Sánchez *et al.*, 2023). Las limitaciones tecnológicas, sumadas a los altos costos de insumos, constituyen obstáculos adicionales que comprometen la sostenibilidad del cultivo en muchos países, incluido Chile.

Dentro de los factores de manejo agronómico, la densidad de siembra se reconoce como una variable determinante para la productividad del maíz. Este parámetro, definido como el número de plantas establecidas por unidad de superficie, regula el aprovechamiento de los recursos disponibles, particularmente radiación solar, agua y nutrientes. Una densidad excesiva puede generar competencia entre plantas, reduciendo el desarrollo vegetativo y el llenado de grano, mientras que densidades muy bajas limitan la captación de recursos y reducen el potencial de rendimiento (Israel *et al.*, 2018; García-López y Hernández, 2023).

La densidad de siembra incide directamente en la morfología de la planta, modificando la altura, la inserción de la mazorca y el número de hileras, factores que a su vez condicionan el rendimiento expresado en toneladas por hectárea

(Israel *et al.*, 2018). Ajustar este componente de manejo se convierte, por lo tanto, en una herramienta clave para optimizar la eficiencia productiva en distintos ambientes de cultivo. En este marco, los híbridos modernos han sido diseñados para responder favorablemente a diversas condiciones de manejo y a una mayor intensificación del cultivo. Actualmente, los avances en mejora genética han impulsado la creación de híbridos y variedades transgénicas resistentes a plagas y tolerantes a condiciones de estrés hídrico, lo que asegura la continuidad de la producción frente a los desafíos del cambio climático (Rica Elizondo, 2001). Dentro de este escenario, se hace necesario evaluar la respuesta de híbridos modernos bajo condiciones locales de manejo, especialmente en relación con factores determinantes como la densidad de siembra, que influye directamente en la fisiología, la morfología y el rendimiento del cultivo. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo general analizar la influencia de la densidad de población en el crecimiento y rendimiento del híbrido semiprecoz DEKALB 478. El híbrido DK478 se destaca por su elevada productividad, estabilidad y adaptabilidad en las regiones maiceras de la zona centro-sur de Chile. Su comportamiento frente a diferentes densidades de siembra ofrece la posibilidad de generar información localmente relevante para la toma de decisiones en el manejo agronómico.

Como objetivos específicos, se planteó evaluar sus características agronómicas, morfológicas y fisiológicas bajo dos condiciones de densidad, así como determinar el efecto de estas sobre la producción de granos (García-López y Hernández, 2023). A partir de este planteamiento, se estableció la hipótesis de que el aumento en la densidad de siembra intensifica la competencia intraespecífica, reduciendo el desarrollo individual de las plantas, pero optimiza el aprovechamiento de los recursos disponibles y puede traducirse en un incremento del rendimiento por unidad de superficie en comparación con densidades más bajas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio experimental y manejo agronómico: El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental “Camino Penco” de la Asociación del Personal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, ubicada en la comuna de Concepción, Región del Biobío, Chile (36° 47' 26" S 73° 01' 18" W, 14 m). El

clima de la región corresponde a un mediterráneo húmedo, con inviernos lluviosos y veranos secos, caracterizado por una marcada estacionalidad en la distribución de las precipitaciones. Durante el período de evaluación (2022–2023), la temperatura mínima promedio fue de 9,2 °C y la máxima de 22,1 °C, mientras que las precipitaciones acumuladas alcanzaron 654,3 mm (Agromet, 2025). Los datos climáticos durante el ciclo de cultivo están presentados en la Tabla 1.

Se utilizó el híbrido de maíz semiprecoz DEKALB 478, reconocido por su adaptabilidad en la zona centro-sur del país. El establecimiento del cultivo se realizó bajo un diseño experimental de bloques completos (DBC). Con dos tratamientos de densidades de siembra (D1 = 133.350 plantas ha⁻¹ y D2 = 66.650 plantas ha⁻¹) y cuatro repeticiones por tratamiento, totalizando ocho parcelas. Previo a la siembra, se efectuó un análisis químico de suelo para determinar las condiciones de fertilidad inicial (Apéndice 1).

Tabla 1. Datos climáticos durante el ciclo de cultivo (2022-2023).

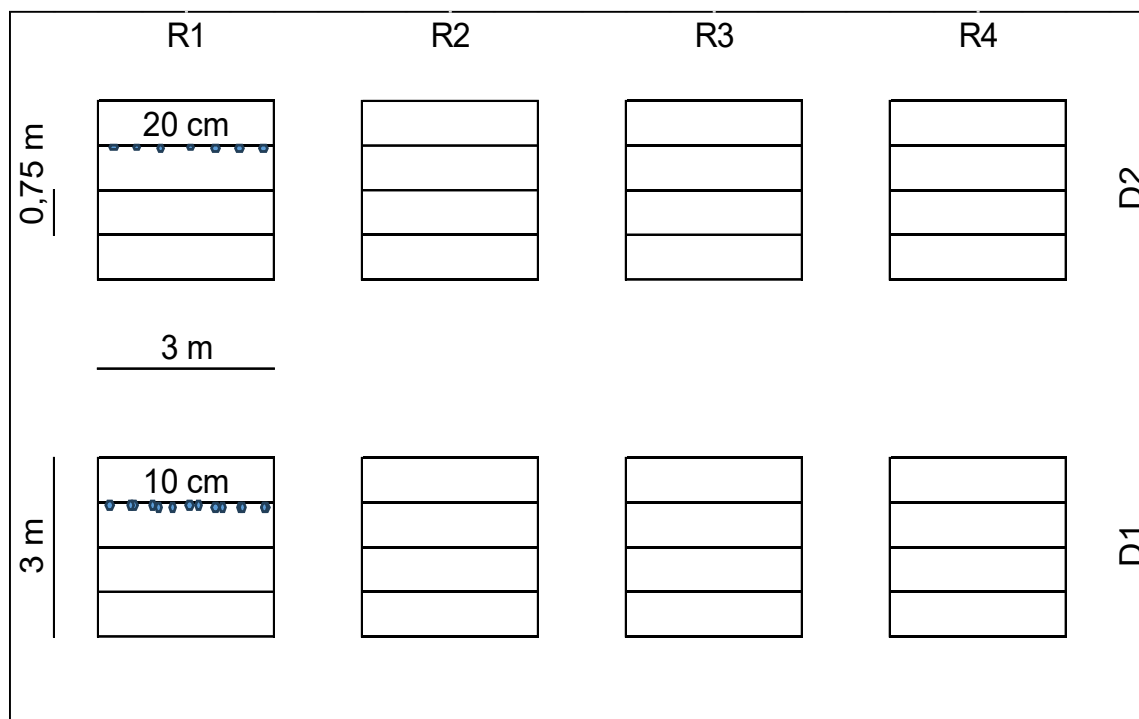
Mes	Tmed (°C)	Tmin (°C)	Tmáx (°C)	Hr (%)	PA (mm)	ETP ₀ (mm)
Nov-2022	15,5	11,9	19,1	76,8	2,6	120
Dic-2022	17,3	12,6	21,9	71,1	8,4	140
Ene-2023	17,2	12,7	21,7	70,3	4,0	150
Feb-2023	17,5	12,4	22,6	68,8	0,8	130
Mar-2023	16,6	12,4	20,7	75,8	6,0	110

*Tmed, temperatura media; Tmin, temperatura mínima; Tmáx, temperatura máxima; Hr, humedad relativa; PA, precipitación acumulada; ETP₀, evapotranspiración potencial.

La siembra manual se llevó a cabo el 7 de noviembre de 2022. En el establecimiento se aplicó una fertilización de base con 185,3 kg ha⁻¹ de mezcla NPK (9-41-12), equivalente a 16,7 kg N ha⁻¹, que junto a los 73,8 kg N ha⁻¹ disponibles en el suelo permitió alcanzar un total de 90,5 kg N ha⁻¹, correspondiente al 25 % del requerimiento total de nitrógeno. La segunda aplicación se efectuó a fines de diciembre, en la etapa de siete hojas expandidas (V7 según escala BBCH; Meier, 2001), mediante la aplicación de 590 kg ha⁻¹ de urea, equivalente a 271,5 kg N ha⁻¹, correspondiente al 75 % del requerimiento total (Ciampitti *et al.*, 2016; Fundación Chile, 2011).

Cada unidad experimental tuvo una superficie de 9 m² (3 × 3 m) (Figura 1) compuesta por cinco hileras separadas a 0,75 m entre sí. Para evitar el estrés hídrico, se aplicó riego por aspersión equivalente a 50 mm cada dos semanas, desde la etapa de floración masculina (VT) hasta la madurez fisiológica (R6), completando cuatro riegos. La cosecha se realizó en la madurez de cosecha (R9) cuando el grano alcanzó una humedad del 15 % (15 de marzo, 2023).

Figura 1. Esquema del ensayo en la estación experimental de Camino Penco.



D1: distancia sobre hilera de 10 cm = 133 350 plantas ha⁻¹; y D2: distancia sobre hilera de 20 cm = 66 650 plantas ha⁻¹

Evaluación del contenido de clorofila: El contenido de clorofila se evaluó utilizando un medidor Hansatech CL-01 (Hansatech, UK). Las mediciones se efectuaron cada dos semanas desde la etapa V4 hasta R6, siempre entre las 12:00 y las 14:00 h para reducir la variabilidad por condiciones ambientales. En cada parcela se seleccionaron cinco plantas al azar y las mediciones se realizaron en la última hoja completamente expandida, hasta la aparición de la hoja de la mazorca.

Características agronómicas: En la aparición de los estigmas (R1), cuando la

planta alcanzó su máximo crecimiento vegetativo, se midió la altura de planta (desde la base del tallo hasta la extremidad de la panoja), el área foliar de la hoja de la mazorca (largo \times ancho \times 0,75), número de hojas por planta, ángulo de la hoja de la mazorca con un transportador (0-180°) y diámetro del tallo en el primer entrenudo con calibrador Vernier.

En la cosecha (R9) se evaluaron: número de plantas por metro cuadrado, número de mazorcas por metro cuadrado, peso seco de la biomasa aérea (BA) y rendimiento de grano (RG), obtenido a partir de las dos hileras centrales de cada parcela. Con estos valores se calculó el índice de cosecha ($IC = RG/BA$).

Además, se determinó el número de granos por mazorca mediante el desgrane y fotografía de las mazorcas sobre un panel blanco, para su posterior análisis con el software ImageJ. El peso de 100 granos se estimó a partir de una submuestra de 15 mazorcas seleccionadas al azar de las hileras centrales.

Análisis estadístico: En primera instancia, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro–Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Para identificar diferencias entre los tratamientos de densidad de siembra (D1 vs. D2), se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes. Se consideraron diferencias significativas cuando $p < 0,05$.

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS v.23 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.), mientras que la elaboración de figuras relacionadas con los rasgos agronómicos, fisiológicos y morfológicos se llevó a cabo con Microsoft Excel (Microsoft Corp., EE. UU.)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la densidad de siembra sobre la biomasa y componentes del rendimiento del híbrido DK478

El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre las densidades de siembra evaluadas (D1 y D2) para la mayoría de los variables productivos del híbrido de maíz DK478. En general (Figura 2), la densidad más estrecha (D1, 10cm entre plantas) incrementó la biomasa total y el rendimiento de grano por hectárea, mientras que la menor densidad (D2, 20 cm) favoreció parámetros asociados al desarrollo individual de cada planta, como el número y peso de granos por mazorca

(Rene y Solís, 2018). Estos resultados reflejan un claro efecto de la competencia intraespecífica en la expresión productiva del cultivo.

En relación con la biomasa (Figura 2A), la D1 alcanzó valores cercanos a 50 t ha⁻¹, superando de manera significativa a la D2, que se situó en torno a 40 t ha⁻¹. Este incremento está vinculado con una mayor captación de radiación y mejor aprovechamiento del espacio en coberturas más densas, lo que genera mayor área foliar por superficie cultivada. García-López y Hernández (2023) reportan un comportamiento similar en híbridos brasileños, señalando que el aumento de densidad optimiza la intercepción lumínica y eleva la acumulación de biomasa.

De manera paralela, el rendimiento en grano seco (Figura 2B) mostró un patrón consistente con la biomasa, alcanzando alrededor de 19 t ha⁻¹ en la D1, en comparación con los 14 t ha⁻¹ obtenidos a D2. Este hallazgo coincide con lo descrito por Pagnan *et al.* (2023), quienes demostraron que en maíz la mayor densidad incrementa la eficiencia en el uso de recursos, lo que se traduce en un rendimiento superior por unidad de superficie. El híbrido DK478, por lo tanto, responde favorablemente a altas densidades, evidenciando su plasticidad agronómica para sostener el rendimiento en condiciones de competencia.

El índice de cosecha (Figura 2C), que expresa la proporción de biomasa destinada al grano, también presentó diferencias significativas, siendo mayor en la D1 ($\approx 39\%$) que en la D2 ($\approx 35\%$). Estos resultados sugieren que, además de generar más biomasa, las plantas en densidad estrecha lograron destinar una fracción mayor de asimilados hacia el grano. Kgasago y Reinhardt (2006) señalan que los híbridos modernos de maíz mantienen índices de cosecha elevados aun en condiciones de alta competencia, lo cual es consistente con lo encontrado en este estudio.

En contraste, el número de granos por mazorca (Figura 2D) fue ligeramente mayor en la D2 (≈ 600 granos) respecto a la de D1 (≈ 580 granos), aunque sin diferencias estadísticas significativas. Este resultado se explica porque las plantas a menor densidad disponen de mayores recursos por individuo, lo que favorece la fecundación y el llenado de granos. Alonso-Sánchez *et al.* (2023) indican que la menor competencia en siembras más amplias promueve una mayor prolificidad por

planta, aunque este beneficio no siempre se traduce en mayores rendimientos por superficie debido a la baja población total.

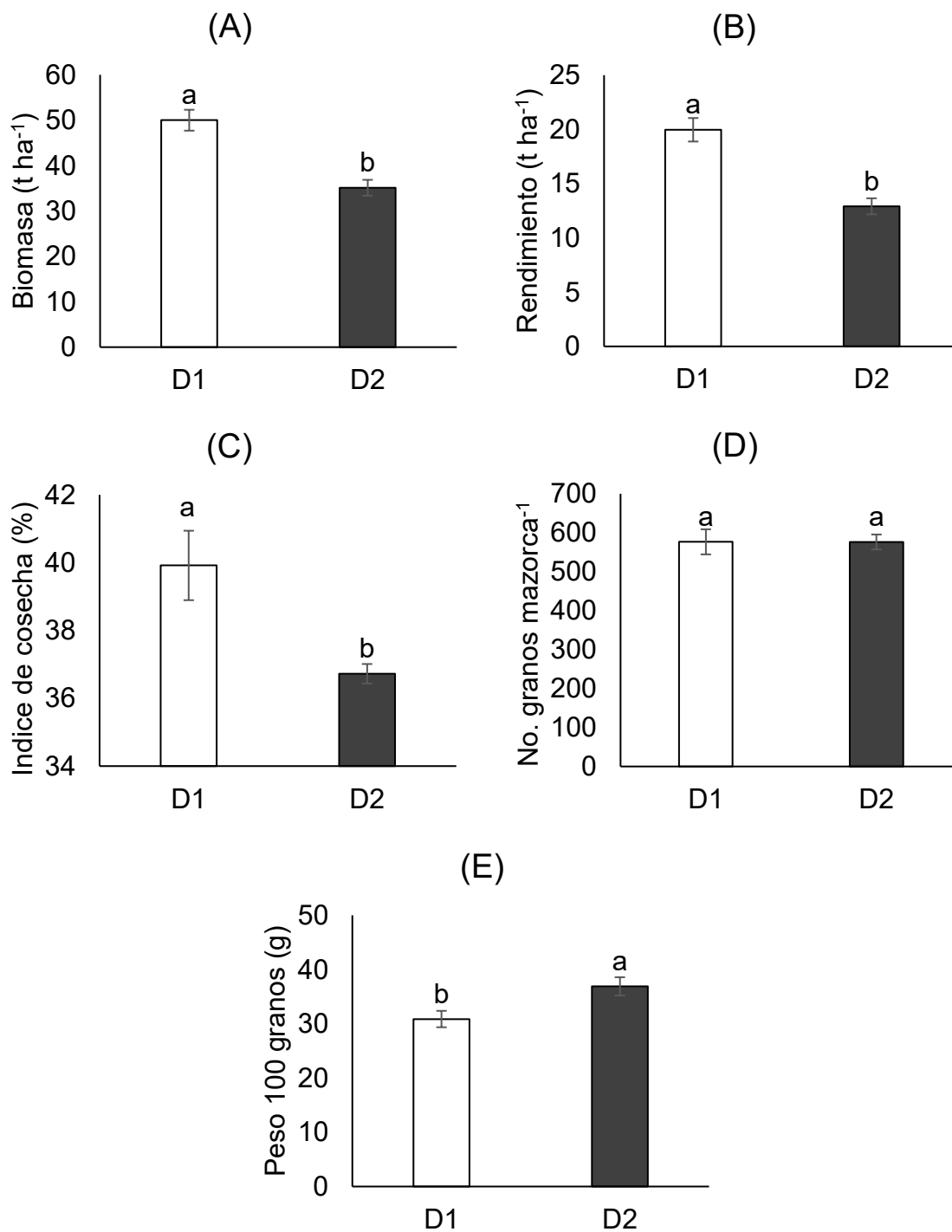
El peso de 100 granos (Figura 2E) presentó un comportamiento inverso al rendimiento: la D2 alcanzó valores promedio de 36 g, significativamente superiores a los 30 g registrados a D1. Este hallazgo responde a un efecto compensatorio típico en maíz: cuando la densidad es baja, cada planta tiene acceso a más nutrientes, agua y luz, lo que favorece el llenado de grano. Nematí *et al.* (2025) ya habían señalado que existe una relación negativa entre densidad de siembra y peso individual del grano, debido a la intensificación de la competencia en poblaciones altas.

Estos resultados evidencian que la D1 maximiza la productividad por unidad de superficie, aunque a expensas de un menor peso y número individual de granos. En cambio, la D2 mejora los atributos de cada mazorca y del grano individual, pero no logra compensar la reducción en el número total de plantas por hectárea Aghaei *et al.* (2022) describen este fenómeno como un balance entre eficiencia poblacional y rendimiento individual, siendo las altas densidades más ventajosas para híbridos modernos seleccionados bajo condiciones de competencia.

El comportamiento del híbrido DK478 en este estudio confirma lo señalado por Israel *et al.* (2018), quienes encontraron que los híbridos de última generación mantienen estabilidad en rendimiento a elevadas poblaciones, gracias a una mejor sincronía entre el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo. Esto sugiere que DK478 posee características fisiológicas que le permiten mantener un buen índice de cosecha y alto rendimiento en siembras densas, lo cual lo convierte en una opción adecuada para sistemas intensivos de producción.

No obstante, debe considerarse que, si bien la alta densidad aumenta la productividad global, puede comprometer algunos atributos de rendimiento del grano, como el peso individual, aspecto que resulta relevante en mercados donde este parámetro tiene valor comercial. De acuerdo con Alonso-Sánchez *et al.* (2023) el manejo óptimo de densidad debe ajustarse no solo al objetivo de maximizar el rendimiento, sino también a las exigencias de calidad y a la disponibilidad de recursos en cada sistema productivo.

Figura 2. Efecto de la densidad de siembra sobre la biomasa y los componentes del rendimiento.



Las barras de error representan la desviación estándar. Las letras muestran la comparación entre ambas densidades mediante la prueba t de Student ($P \leq 0.05$).

Efecto de la densidad de siembra sobre la morfología del híbrido DK478

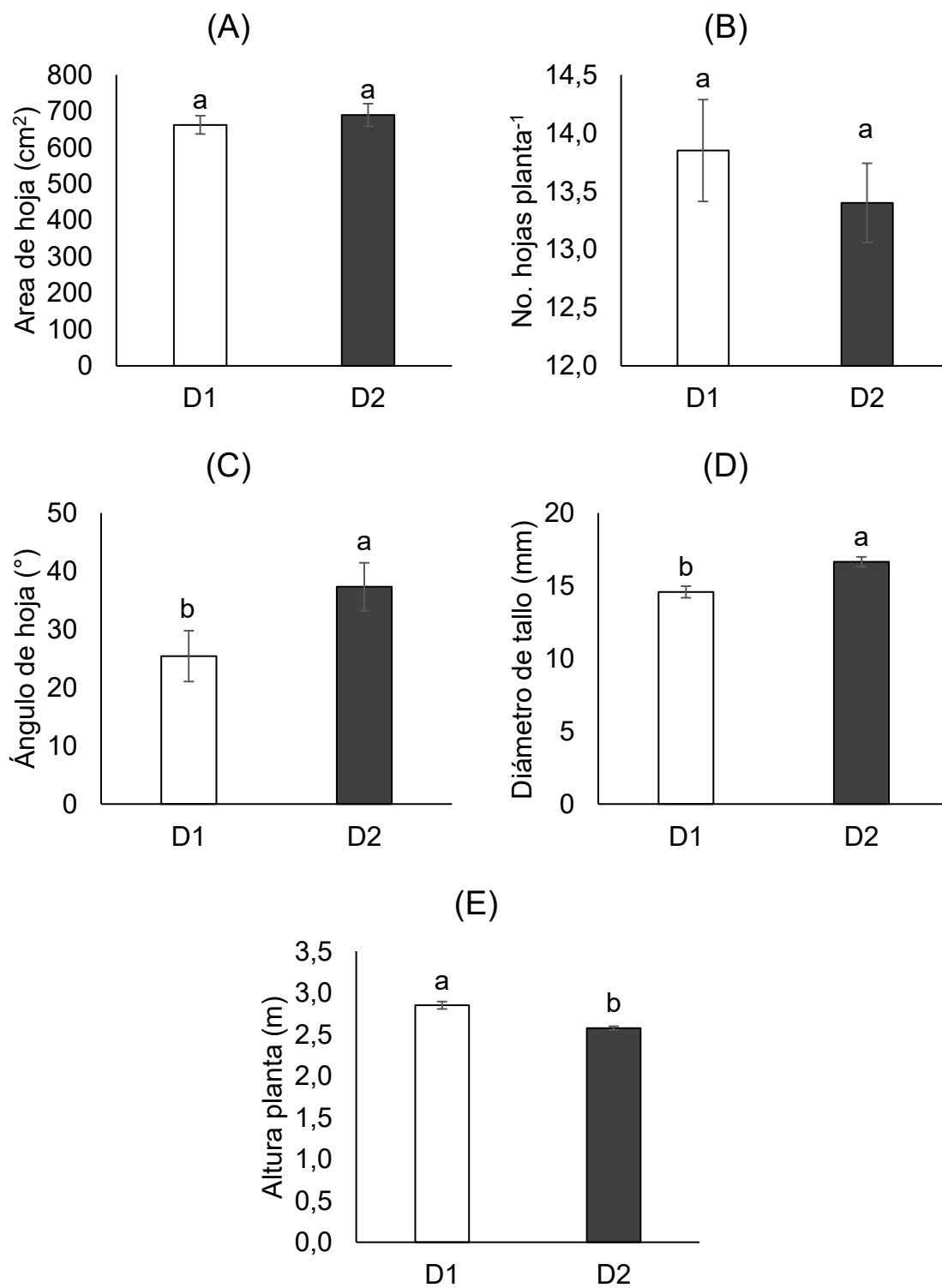
El análisis de los parámetros morfológicos del híbrido DK478 mostró respuestas diferenciadas frente a la densidad de siembra. En el caso del área foliar de la hoja de mazorca (Figura 3A), aunque las diferencias entre las dos densidades no fueron significativas, las plantas del D2 alcanzaron un promedio cercano a 720 cm² por hoja, superando significativamente a las de D1, que registraron alrededor de 680 cm². Este resultado refleja que, cuando el espaciamiento entre plantas es mayor, cada individuo dispone de más recursos y espacio para expandir sus hojas. Según Andrade *et al.* (1999), esta mayor superficie foliar permite a la planta capturar más radiación por hoja, aunque no necesariamente garantiza una mayor producción por hectárea.

En cuanto al número de hojas por planta (Figura 3B), la tendencia fue contraria: las plantas del D1 presentaron un promedio ligeramente mayor ($\approx 13,8$ hojas) frente a las de D2 ($\approx 13,4$ hojas). Aunque la diferencia no fue significativa, evidencia que en condiciones de mayor competencia las plantas tienden a generar una estructura foliar algo más abundante, buscando compensar la limitación de recursos. Este comportamiento ha sido descrito por Israel *et al.* (2018), quien argumenta que el maíz responde a la densidad mediante ajustes en la morfogénesis foliar para mantener la captación de luz.

El ángulo de inserción de las hojas (Figura 3C) fue significativamente menor en la D1 ($\approx 25^\circ$) en comparación con la de D2 ($\approx 37^\circ$). Este rasgo morfológico es clave, ya que un menor ángulo permite que las hojas superiores se dispongan más verticalmente, reduciendo la sombra sobre las hojas inferiores y mejorando la distribución de la radiación en el dosel. Según (García-López y Hernández, 2023), la selección de híbridos modernos de maíz ha favorecido este tipo de arquitectura foliar, lo que facilita el cultivo en altas densidades y contribuye al incremento sostenido de los rendimientos.

El diámetro del tallo (Figura 3D) fue significativamente mayor en las plantas del D2 (≈ 16 mm) respecto a las del D1 (≈ 14 mm). Esto indica que, cuando existe menos competencia, las plantas invierten más en el engrosamiento del tallo, lo que mejora la resistencia mecánica y la tolerancia al acame.

Figura 3. Efecto de la densidad de siembra sobre la morfología.



Las barras de error representan la desviación estándar. Las letras muestran la comparación entre ambas densidades mediante la prueba t de Student ($P \leq 0.05$).

Arcos (2022) señala que esta relación es esperable, ya que la competencia por recursos en altas densidades induce tallos más delgados, lo que en algunos casos puede comprometer la estabilidad estructural de la planta.

Finalmente, la altura de planta (Figura 3E) fue superior en D1 ($\approx 2,8$ m) frente a D2 ($\approx 2,6$ m). Este resultado refleja un patrón clásico de respuesta a la competencia: en ambientes densos, las plantas tienden a crecer más en altura como estrategia para acceder a la luz. Este fenómeno, denominado “etiolación competitiva”, ha sido descrito por Liang *et al.* (2025), quienes explican que la elongación del tallo en altas densidades es un mecanismo adaptativo, aunque puede aumentar la susceptibilidad al acame si no se acompaña de un refuerzo en el diámetro del tallo.

Estos hallazgos en conjunto muestran que el híbrido DK478 responde a la densidad de siembra no solo en términos productivos, sino también mediante ajustes morfológicos que buscan equilibrar la competencia intraespecífica. A mayor densidad, las plantas priorizan la altura y modifican la orientación de sus hojas, mientras que a menor densidad desarrollan estructuras más robustas, con tallos más gruesos y hojas de mayor tamaño.

Desde un punto de vista práctico, estos cambios reflejan la plasticidad fenotípica del híbrido, característica que ha sido clave en la evolución de los programas de mejoramiento de maíz (Julca *et al.*, 2024). La capacidad de ajustar la arquitectura de la planta permite que DK478 pueda sostener rendimientos en densidades altas, aunque el manejo debe considerar los riesgos asociados al acame por tallos más delgados.

La discusión de estos resultados también debe incorporar el hecho de que la arquitectura foliar y el ángulo de hoja son rasgos estratégicos en sistemas intensivos de producción. Un mayor ángulo foliar en densidades altas, como se observó en este estudio, mejora la eficiencia en el uso de la radiación y reduce la competencia lumínica entre plantas, lo cual ha sido destacado como uno de los mayores aportes del mejoramiento genético en híbridos modernos (García-López y Hernández, 2023; Nemati *et al.*, 2025).

Efecto de la densidad de siembra sobre el contenido de clorofila del híbrido DK478

La dinámica de acumulación de clorofila foliar mostró variaciones notables a lo largo del ciclo del cultivo en función de la densidad de siembra (Figura 4). Desde los 40 días después de la siembra (dds), se observaron diferencias entre tratamientos, evidenciándose un aumento progresivo en la concentración de clorofila hasta alcanzar un máximo cercano a los 100 dds, seguido de una ligera reducción hacia la fase final del ciclo. Estos resultados son consistentes con el patrón fisiológico del maíz, donde la síntesis de pigmentos fotosintéticos se intensifica en las etapas de rápido crecimiento vegetativo y floración, estabilizándose posteriormente en el llenado de grano (Mendoza-Elos *et al.*, 2006).

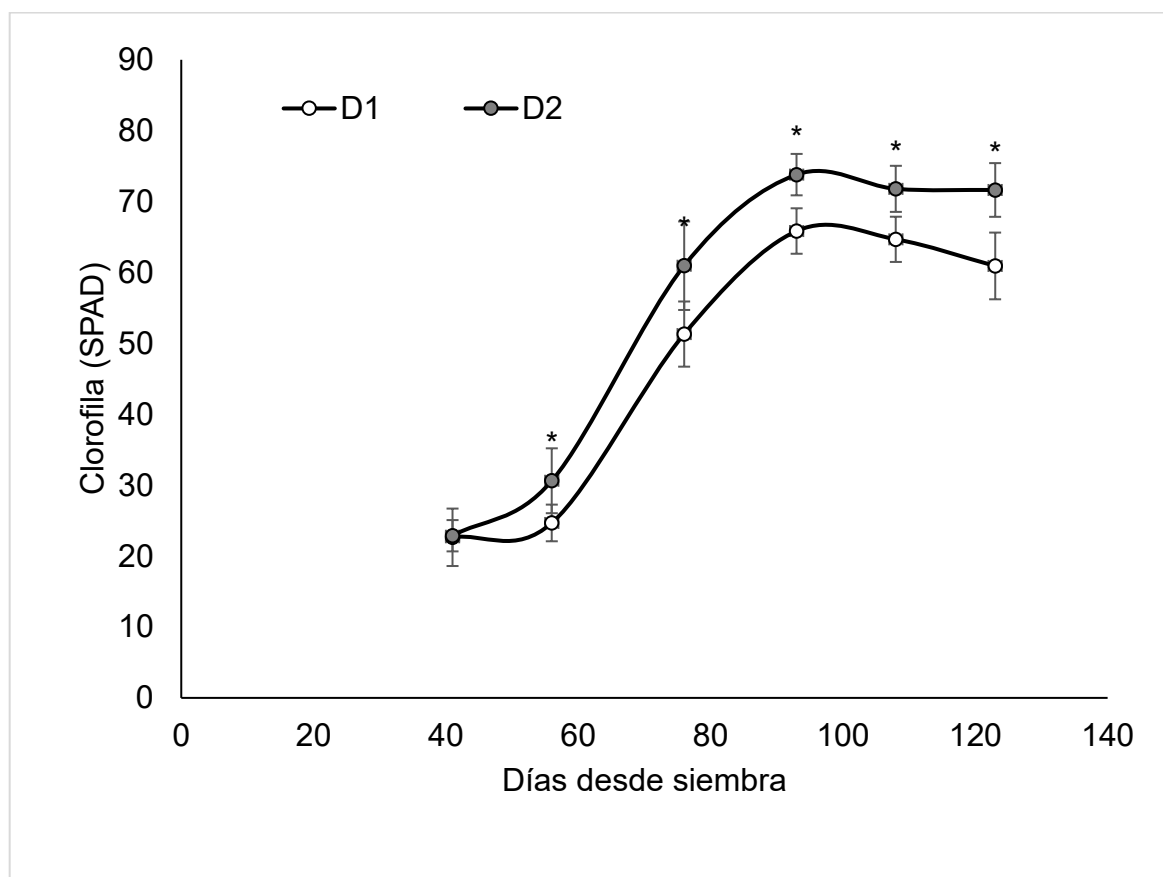
En la D2, los valores de clorofila se mantuvieron consistentemente más altos en comparación con la D1, especialmente a partir de los 60 días, donde las diferencias alcanzaron significancia estadística. A los 80 días, por ejemplo, la D2 presentó valores cercanos a 65 unidades de SPAD, mientras que a D1 estos apenas alcanzaban 55 SPAD. Esta ventaja se mantuvo hasta los 120 días, indicando que una mayor distancia entre plantas favoreció una mayor acumulación de clorofila foliar.

El incremento en la concentración de clorofila en la densidad baja podría estar asociado con una mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo para las plantas de maíz. Además, se observó una diferencia en el contenido de clorofila a los 60 días después de la siembra, posiblemente relacionada con la segunda aplicación de nitrógeno —que representa el 75 % de la necesidad total— realizada alrededor de los 50 días, coincidiendo con la etapa de siete hojas (V7).

Mayor densidad bajó la concentración de clorofila, ya que la competencia intraespecífica limita la disponibilidad de recursos como nitrógeno y agua, fundamentales para bajar la síntesis de pigmentos (García-López y Hernández, 2023). De hecho, hacia los 120 dds, la D2 mantuvo valores relativamente estables, mientras que a D1 se observó una ligera caída, posiblemente vinculada al agotamiento de nutrientes en condiciones de alta competencia.

Desde el punto de vista agronómico, estos resultados sugieren que la densidad de siembra no solo afecta los parámetros de rendimiento, sino también el estado fisiológico de la planta a través de la regulación de la clorofila foliar.

Figura 3. Efecto de la densidad de siembra sobre el contenido de clorofila.



Las barras de error representan la desviación estándar. Los asteriscos (*) indican diferencias significativas entre tratamientos según mediante la prueba t de Student ($P \leq 0.05$).

Una menor concentración de pigmentos en siembras densas podría contribuir a reducir los niveles de biomasa y rendimiento por superficie, ya que puede disminuir la eficiencia individual de la planta. Así, el espaciamiento óptimo deberá considerar un equilibrio entre la competencia intraespecífica, la captura de luz y la capacidad de las plantas para sostener sus funciones fotosintéticas a lo largo del tiempo.

CONCLUSIONES

El estudio evaluó la respuesta del híbrido de maíz semi-precoz DEKALB 478 bajo dos densidades de siembra ($D1 = 133.350$ plantas ha^{-1} y $D2 = 66.650$ plantas ha^{-1}), evidenciando diferencias significativas en el crecimiento, la acumulación de biomasa, los parámetros fisiológicos y el rendimiento de grano.

1. La D1 generó los mayores valores de biomasa aérea (≈ 55 t ha^{-1}) y

rendimiento de grano ($\approx 19 \text{ t ha}^{-1}$), lo que confirma que este híbrido posee un alto potencial productivo en ambientes de competencia elevada. Estos resultados son consistentes con lo reportado en híbridos modernos seleccionados para responder favorablemente a sistemas intensivos.

2. La D2, si bien redujo el rendimiento por superficie ($\approx 14 \text{ t ha}^{-1}$), permitió obtener granos de mayor peso, tallos más gruesos y hojas de mayor tamaño, atributos que refuerzan la importancia de ajustar la densidad de siembra de acuerdo con los objetivos productivos (rendimiento total vs. calidad del grano).
3. En términos fisiomorfológicos, la mayor densidad de siembra modificó la arquitectura foliar del híbrido DK478, evidenciando mecanismos de plasticidad adaptativa frente a la competencia lumínica. Gracias a esta plasticidad, el híbrido logra mantener índices de cosecha elevados incluso bajo condiciones de alta competencia, lo que contribuye a una mayor estabilidad productiva frente a variaciones en el manejo agronómico.

REFERENCIAS

1. Aghaei, S., Karimi Alavijeh, M., Shafiei, M., y Karimi, K. (2022). A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: Worldwide potential, environmental importance, and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106447. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106447>
2. Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zaragoza-Esparza, J., López-López, C., Zamudio-González, B., Monter-Santillán, A., Turrent-Fernández, A., Arteaga-Escamilla, I., y Mora-García, K. (2023). Efecto de la densidad de población y la fertilización sobre la productividad del agua y rendimientos de híbridos de maíz en el valle de México. *Terra Latinoamericana*. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1673>
3. Arcos, E. (2022). *Comportamiento del híbrido de maíz dk-390 (Zea mays L.) bajo sombra de dos sistemas agroforestales multiestrato cedro (Cedrela odorata) y poró (Erythrina poeppigiana)* [Master's thesis, CATIE]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11800>
4. García-López, D., y Hernández, R. A. (2023). Estudio de altas densidades de siembra en la producción de maíz (Zea mays) híbrido. *Revista Tecnología En Marcha*, 36(4). <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6427>
5. INE (2025). *Estudio de intenciones de siembra de cultivos anuales*. Instituto Nacional de Estadísticas. Gobierno de Chile.
6. Israel, D., Delfaz, I., Ronaldo, J., y Orellana, T. (2018). *Efecto de la densidad y arreglo de siembra en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz*

- (*Zea mays* L.) [Bachelor's thesis, Zamorano University].
7. Julca, S., y Rosa, B. (2022). *Evaluación del rendimiento de grano de 09 híbridos comerciales de maíz amarillo (Zea mays L.), en el distrito La Capilla, Cutervo, región Cajamarca* [Bachelor's thesis, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
 8. Kgasago, H. (2006). *Effect of planting dates and densities on yield and yield components of short and ultra-short growth period maize (Zea mays L.)* [Master's thesis, University of Pretoria]. <http://hdl.handle.net/2263/29219>
 9. Liang, Q., Chang, H., Chen, H., Wu, Q., Qin, Y., Wang, Z., Wang, G., Li, X., Chen, W., Wu, J., Wang, Q., y Wang, J. (2025). The agronomic mechanism of root lodging resistance and yield stability for sweet corn in response to planting density and nitrogen rates at different planting dates. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1481033. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1481033>
 10. Meier, U. (Ed.). (2001). Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH monograph (2nd ed.). Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry.
 11. Mendoza-Elos, M., Mosqueda-Villagómez, C., Rangel-Lucio, J. A., López-Benítez, A., Rodríguez-Herrera, S. A., Latournerie-Moreno, L., & Moreno-Martínez, E. (2006). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura Técnica en México*, 32(1), 89–99. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172006000100009
 12. Nemati, A., Khajali, F., Asadi-Khashouie, E., Zare-Moghaddam, A. K., y Ahmadipour, B. (2025). Does the type of cereal grain in the diet influence egg quantity and quality measures of laying hens without the use of carbohydrases? *Poultry Science Journal*, 13(2), 253–260. <https://doi.org/10.22069/psj.2025.23064.2219>
 13. Pagnan, L., Gonzalez, L., Roque, D., y Carolina, C. (2023). *Fecha de siembra, densidad y ajuste de la fertilización nitrogenada en maíz* (Informe técnico No. 20). INTA EEA Marcos Juárez, AER Justiniano Posse. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/15037>
 14. Rene, N., y Solis, M. (2019). *Efecto de tres densidades de siembra en el rendimiento de cuatro híbridos de maíz (Zea mays L.), bajo condiciones de Pueblo Nuevo* [Bachelor's thesis, Universidad Nacional Agraria de la Selva].
 15. Quimbo, S., y De La Torre Parra, L. (2024). Ancestral healing rituals and the significance of taky samy in Andean spirituality. *Explore*, 20(6), 103075. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2024.103075>
 16. Elizondo, J., y Boschini, C. (2001). Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad del forraje de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 12(2), 181–187. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43712208>
 17. Trnka, R., Krtek, A., y Lorencova, R. (2024). Bridging realms: Western client perspectives on psychotherapy inspired by indigenous healing. *Explore*, 20(6), 103059. <https://doi.org/10.1016/j.explore.2024.103059>

APÉNDICES

Apéndice 1. Resultados del análisis químico del suelo en la estación experimental Camino Penco, Concepción.

Suelo	Unidades	Valor
pH en agua	--	6,32
Materia Orgánica	%	1,78
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/Kg	11,1
Amonio (N-NH ₄ ⁺)	mg/Kg	5,6
Nitrógeno Disponible	mg/Kg	16,6
Fósforo Olsen	mg/Kg	7,2
K disponible	mg/Kg	84,9
K intercambiable	cmol/Kg	0,22

*El análisis fue hecho en el Laboratorio de análisis de Suelo y Plantas de la Universidad de Concepción.