



Relaciones funcionales, determinantes eco-fisiológicos y del rendimiento en híbridos de maíz (*Zea mays* L.) de la compañía Dekalb.

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Cultivos de Granos de la Universidad de Buenos Aires.

José Francisco Leiva

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de La Plata - 2009

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

16 de Febrero de 2024

COMITÉ CONSEJERO

Tutor de Trabajo Final
Dr. Juan Ignacio Cagnola
Ingeniero Agrónomo (FAUBA, 2008)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (FAUBA, 2013)

JURADO DE TRABAJO FINAL

JURADO
Dra. Luciana Ayelen Galizia
Ingeniera Agrónoma (FAUBA)
Doctora en Ciencias Agropecuarias (FAUBA)

JURADO
Dr. Salvador Incognito
Ingeniero Agrónomo (UNLZ)
Magister en Genética Vegetal (UNR-INTA)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (FAUBA)

Fecha de defensa de la tesis: 16 de Febrero de 2024

AGRADECIMIENTOS

En especial, a Juan Ignacio Cagnola por su paciencia y dedicación en todo momento, guiándome en este proceso de aprendizaje continuo para poder formarme como mejor profesional.

A los chicos del campo experimental de Monsanto-Bayer, quienes me ayudaron con la conducción y toma de datos en los ensayos a campo.

A la empresa Monsanto-Bayer, en la cual trabajo, por brindarme el tiempo y espacio para poder cursar y rendir mi posgrado, como así también poder usar los datos para mi tesis.

A mi familia y amigos por el constante apoyo en todas mis decisiones personales y profesionales.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

‰: porcentaje.

°C: grados Celsius.

ϕ : diámetro.

ϕ_E : diámetro de la espiga.

$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$: micro moles por metro cuadrado por segundo.

AS: área sembrada.

BA: biomasa aérea.

BP: biomasa de la planta.

ca.: cercano a.

cm: centímetros.

cm^3 : centímetros cúbicos.

E_1 : espiga apical.

E_2 : espiga sub-apical.

E-R1: período de emergencia a R1.

ET: evapotranspiración.

ETP: evapotranspiración potencial.

EUR: eficiencia en el uso de la radiación.

EUR_{PC} : eficiencia en el uso de la radiación durante el período crítico.

Exp.R: experimento bajo riego.

Exp.S: experimento en seco.

f_{RFAi} : fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada.

g/d: gramos por día.

g/grano: gramos por grano.

g/m^2 : gramos por metro cuadrado.

g/MJ: gramos por megajulios.

g/pl: gramos por planta.

h: altura.

ha: hectárea.

IC: índice de cosecha.

kg/ha d: kilos por hectárea por día.

kg/ha: kilos por hectárea.

kg/planta d: kilos por planta por día.

m: metros

MJ/m²: megajulios por metro cuadrado.

mm: milímetros.

mm/ha: milímetros por hectárea.

N/ha.: Nitrógeno por hectárea.

NG: número de granos.

NGE: número de granos por espiga.

NGE₁: número de granos en la espiga apical.

NGE₂: número de granos en la espiga sub-apical.

NGP: número de granos por planta.

NGT: número de granos totales.

PG: peso de los granos.

pl/m²: plantas por metro cuadrado.

R²: coeficiente de regresión.

RA: rendimiento por área.

RFA: radiación fotosintéticamente activa.

RFA_{AC}: radiación fotosintéticamente activa acumulada.

RFA_{BC}: radiación fotosintéticamente activa por debajo del canopeo.

RFA_{IN}: radiación fotosintéticamente activa incidente.

RFA_{TC}: radiación fotosintéticamente activa por encima del canopeo.

RP: rendimiento por planta.

TCC: tasa de crecimiento del cultivo.

TCE: tasa de crecimiento de la espiga.

TCE_{1-PC}: tasa de crecimiento de la espiga apical durante el período crítico.

TCE_{2-PC}: tasa de crecimiento de la espiga sub-apical durante el período crítico.

TCE_{PC}: tasa de crecimiento de la espiga durante el período crítico.

TCP: tasa de crecimiento de la planta.

TCP_{PC}: tasa de crecimiento de la planta durante el período crítico.

TM: temperatura media.

T_{MAX}: temperatura máxima.

Tn/ha: toneladas por hectárea

VT3P: biotecnología/evento para el control de insectos marca registrada por Monsanto-Bayer.

RESUMEN

En los últimos años en Argentina se ha modificado la distribución del cultivo de maíz. Dicho cambio se observa tanto en el desplazamiento del cultivo hacia zonas marginales dentro de las regiones tradicionales de siembra (norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba) como en la mayor participación en la superficie cultivada de provincias que anteriormente se encontraban en segundo plano, como La Pampa, Chaco, Santiago del Estero, Entre Ríos, Salta y Tucumán. Este desplazamiento de la frontera maicera ha llevado a exponer al cultivo a situaciones productivas diferentes a las exploradas en aquellos ambientes donde típicamente se producía maíz, mencionados anteriormente. Por esta razón, conocer en detalle el comportamiento de los diferentes genotipos y sus atributos ecofisiológicos al explorar diferentes ambientes sería de gran ventaja para ajustar su posicionamiento y las prácticas agronómicas (v.g., densidad de siembra) que maximicen el rendimiento. En este trabajo se estudiaron atributos ecofisiológicos relacionados con la interceptación de luz, la producción de biomasa y el rendimiento de grano (TCP_{PC} , TCE_{PC} , NG, umbrales y prolificidad) y se establecieron las diferentes relaciones funcionales entre ellas para cuatro híbridos de maíz que componen el portafolio de híbridos *Dekalb*: DK692, DK70-10, DK72-50 y DK72-10. Se implantó un ensayo en condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica y densidades de plantas. Los híbridos no difirieron para su rendimiento potencial, pero sí en la estrategia de generación del mismo. DK692 tuvo la mayor prolificidad posicionándolo para ambientes de baja densidad y rendimientos variables que requieren una alta plasticidad. Por el contrario, DK72-10 se posiciona como una excelente alternativa para planteos de alta densidad en ambientes de alto potencial ya que genera su rendimiento en una sola espiga otorgándole una alta eficiencia reproductiva. Estos resultados

generaron información útil que permite maximizar el rinde de cada genotipo posicionándolo y manejándolo agronómicamente de una manera correcta para ambientes de potencial contrastante.

INTRODUCCIÓN

Marco teórico

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los principales cultivos a nivel mundial debido a su importante contribución en la alimentación y nutrición humana, junto con el trigo, el arroz y la soja (Ray *et al.*, 2013). A nivel mundial, el maíz representa uno de los mayores volúmenes de producción (ca. 1.162 millones de toneladas en el año 2020) y ocupa el segundo lugar en superficie cosechada (ca. 201 millones en 2020) (FAO-STAT 2022). Por su parte, Argentina en el año 2020 produjo 58,3 millones de toneladas en un área cosechada de 7,7 millones de hectáreas, lo que arroja un rendimiento promedio de 7,5 toneladas por hectárea (FAO-STAT 2022), siendo uno de los principales países exportadores en el mercado global (Andorf *et al.*, 2019).

En los últimos años, en Argentina, se experimentó un aumento en sus niveles de producción de maíz debido al aumento del área sembrada (AS, ha) y los rendimientos por área (RA, Tn/ha) (SAGyP, 2022). El aumento del AS implicó cambios en la distribución del cultivo, partiendo de las zonas tradicionales (i.e., pampa ondulada) y ampliándose hacia regiones áridas y semi-áridas (Rotili *et al.*, 2019). La expansión hacia zonas no tradicionales se debe en parte a la estabilización de los rendimientos en fechas de siembra tardías (Florio *et al.*, 2014) como también a la mayor participación en superficie cultivada de provincias que anteriormente se encontraban en segundo plano, como Chaco, Santiago del Estero, Entre Ríos, Salta y Tucumán (FAO-STAT 2022). Esta expansión hacia zonas no tradicionales, acrecienta la variabilidad edafo-climática que experimentan los cultivos de maíz en situaciones de producción (Otegui *et al.*, 2021).

La compañía *Dekalb* es una empresa dedicada al mejoramiento de maíz que provee de semillas híbridas a los productores y además ofrece a sus clientes un servicio de predicción de rendimientos esperados para su cultivo a través de una aplicación denominada CULTIVIO (www.cultivio.com). Conocer los rendimientos esperados ayuda a los productores a tomar diferentes decisiones y prácticas de manejo como la fecha de siembra, densidad de siembra y fertilización nitrogenada o a planificar actividades de control (v.g., enfermedades y/o plagas) o aquellas asociadas a la cosecha. Para la predicción del rendimiento esperado, CULTIVIO simula las condiciones de producción a través de una interfase interactiva para los productores que deben geolocalizar el lote, sugerir una fecha tentativa de siembra, indicar el nivel de humedad del suelo a la siembra (100%, 75%, 50% o menor a 50%) e indicar si se trata de un año NIÑO o NIÑA (Bert *et al.*, 2006). Estas simulaciones contemplan la respuesta de un híbrido genérico de maíz. Sin embargo, se ha demostrado que los rendimientos potenciales, el impacto de adversidades y las recomendaciones de densidad de siembra, fertilización nitrogenada y fechas de siembra son híbrido-específicas (Hernández *et al.*, 2014; Maltese *et al.*, 2020). Para mejorar la predicción de rendimientos esperado para cada híbrido se debería contar con la información pertinente de cada uno de ellos.

Existen variables que caracterizan diferentes aspectos del crecimiento, desarrollo y rendimiento de un híbrido. Una caracterización detallada de los híbridos implica el conocimiento de los componentes numéricos del rendimiento, los determinantes eco-fisiológicos y las relaciones funcionales durante el período crítico. El rendimiento por área (RA, g/m²) es generado por dos componentes numéricos: el número de granos por área (NG, g/m²) y el peso de cada uno de esos granos (PG, g/grano). El RA puede explicarse a través de diferentes factores ambientales

que son interceptados por el cultivo como radiación, agua y nutrición. Cuando nos focalizamos en la radiación, los determinantes eco-fisiológicos definen la acumulación de radiación interceptada (MJ/m^2) que luego es convertida en biomasa (kg/ha) con determinada eficiencia (i.e., eficiencia en el uso de la radiación, EUR, g/MJ). Consecuentemente, definen también la proporción de esa biomasa que es cosechada según el índice de cosecha (IC, %). El período crítico (PC) de definición del rendimiento está centrado en la floración femenina (R1, Ritchie *et al.*, 1993), comienza 15 días antes (V15) y finaliza 15 días después (R2) (Cerrudo *et al.*, 2013). Las relaciones funcionales durante el período crítico también sirven para caracterizar a un híbrido: la tasa de crecimiento hace referencia a la velocidad de acumulación de biomasa, se puede medir por planta (TCP, $\text{Kg}/\text{planta d}$), por cultivo (TCC, $\text{Kg}/\text{ha d}$) o por espiga (TCE, g/d). Las eficiencias reproductivas (i.e. número de granos fijados por unidad de crecimiento de la espiga) brindan una idea de cómo se utiliza la biomasa particionada a estructuras reproductivas (TCE/TCP). Otras variables que resultan interesantes conocer son la prolificidad (cantidad de espigas que desarrolla una misma planta) (Parco *et al.*, 2020) o el desarrollo de macollos (Rotili *et al.*, 2021) que aumentan la plasticidad de la planta de maíz otorgando estabilidad de rendimientos en un amplio rango de ambientes. El conocimiento de todas estas variables permitiría una mejor interpretación del comportamiento de los híbridos bajo escenarios productivos.

Objetivos generales del proyecto

El objetivo general del proyecto fue caracterizar 4 híbridos comerciales de la compañía semillera *Dekalb* con el fin de obtener la información necesaria para realizar recomendaciones híbrido-específicas.

Objetivos particulares del proyecto

Para alcanzar el objetivo general nos planteamos los siguientes objetivos particulares:

Objetivo (i): Determinar los componentes numéricos del rendimiento de 4 híbridos comerciales de maíz.

Objetivo (ii): Evaluar los determinantes eco-fisiológicos del rendimiento de 4 híbridos comerciales de maíz.

Objetivo (iii): Caracterizar las relaciones funcionales de la generación de granos y la tasa de crecimiento de la planta, la partición de biomasa hacia la espiga y la eficiencia reproductiva de la espiga durante el período crítico para 4 híbridos de maíz.

Justificación

La compañía *Dekalb* tiene especial interés en conocer y determinar los parámetros fisiológicos de cada uno de sus híbridos para lograr recomendaciones técnicas de manejo sitio-específico más certeras y eficientes; y para predecir el comportamiento de sus híbridos ante diferentes situaciones productivas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental y tratamientos

Para la caracterización de los híbridos se realizaron dos experimentos durante la campaña agrícola 2014-2015 en el campo experimental y en el centro de entrenamiento del área de desarrollo tecnológico de Bayer Argentina (33°52'S; 60°40'W), situado en la localidad de Pergamino, provincia de Buenos Aires. Ambos experimentos consistieron en un arreglo factorial de cuatro híbridos *Dekalb* (DK692, DK70-10, DK72-10 y DK72-50, cuyas madureces relativas eran de 118, 120, 122 y 122 días, respectivamente), que fueron elegidos por su representatividad en función a su volumen de penetración en el mercado argentino, y cuatro densidades de siembra (2, 6, 12, y 18 pl/m²). Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño de parcelas divididas con 2 repeticiones (Fig. 1) donde la parcela principal fue asignada al tratamiento de densidades y la sub-parcela al tratamiento de híbridos. Un experimento se realizó en secano (Exp.S) y otro bajo riego por goteo (Exp.R) con el objetivo de que los híbridos exploren un amplio rango de tasas de crecimiento. Las parcelas se implantaron con sembradora experimental de ocho surcos distanciados a 0,52 metros entre líneas y un largo de 10 metros que luego fueron raleadas manualmente para ajustar el número de plantas a las densidades objetivos. Se sembraron parcelas idénticas como borduras para aislar cada sub-parcela del diseño experimental (Fig. 1). Los ensayos se fertilizaron con una dosis de urea equivalente a 200 kg N/ha como fuente nitrogenada en el estado de seis hojas expandidas (V₆; Ritchie *et al.*, 1993). En los experimentos con riego, la disponibilidad de agua en el metro superior del perfil de suelo se mantuvo cercana a capacidad de campo a lo largo de la estación de crecimiento. Las parcelas se mantuvieron libres

de malezas, plagas y enfermedades a través de controles químicos y mecánicos en función a umbrales de manejo. Todos los híbridos contaron con la biotecnología VT3P que otorga resistencia a las principales plagas lepidópteras. Las condiciones hídricas y densidades de siembra fueron utilizadas para generar variaciones contrastantes en la tasa de crecimiento por planta en el periodo crítico (TCP_{PC}).

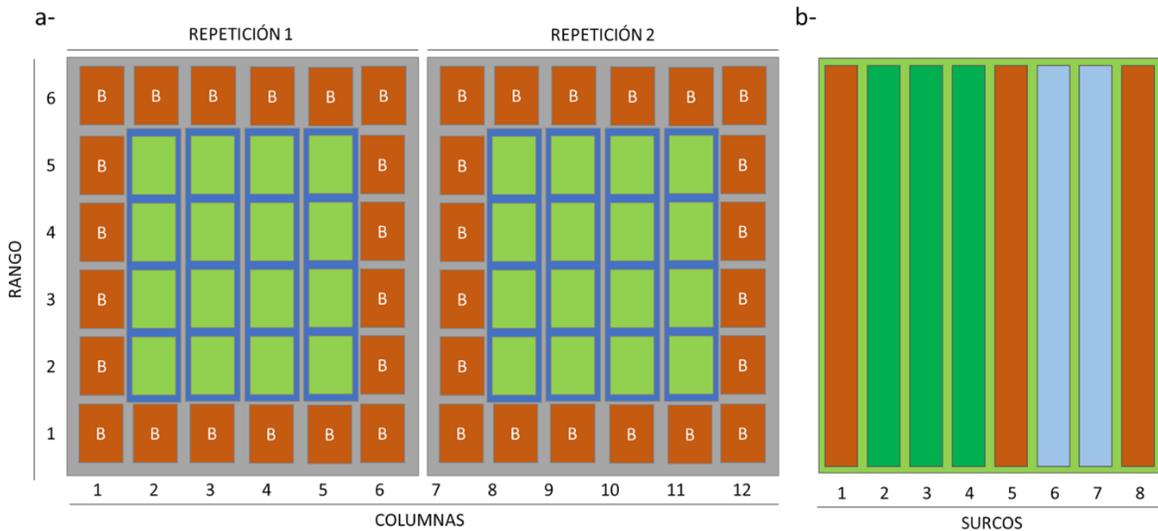


Figura 1: a-Representación esquemática del diseño experimental utilizado para el Exp.S y Exp.R. Se observan las repeticiones (cuadrantes grises), la parcela principal con los tratamientos de densidad (cuadrantes azules) y las sub-parcelas con el tratamiento de híbridos distribuidos (cuadrantes verdes). Los cuadrantes rojos representan las parcelas de bordura. Este esquema no representa las dimensiones (dado que está fuera de escala) y aleatorización específica. b- Representación esquemática de la parcela con sus 8 surcos distanciados a 0.52m. En el 2do, 3er y 4to surco se utilizó para evaluar las plantas marcadas (ver abajo). El 6to y 7mo surco se utilizó para la construcción del modelo alométrico (ver abajo). El 1er, 5to y 8vo surco actuó de bordura.

Recolección de datos meteorológicos

Los datos de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA_{IN}), temperatura ambiente y precipitaciones fueron registrados mediante una estación meteorológica ubicada próxima a ambos experimentos. La radiación fotosintéticamente activa acumulada (RFA_{AC} , MJ/m²) se calculó como la sumatoria de la RFA_{IN} diaria durante todo el ciclo, desde la siembra (1 de noviembre de 2014) hasta la cosecha (11 de marzo de 2015), o durante el período crítico ($R_1 \pm 15$ días, desde el 14 de diciembre de 2014 hasta el 13 de enero de 2015), promedio de todos los híbridos y condiciones. Durante los mismos períodos se calculó la temperatura promedio (°C, promedio de las temperaturas medias diarias), cantidad de días con golpes de calor ($T_{MAX} > 35^\circ\text{C}$, Rattalino *et al.*, 2011), las precipitaciones acumuladas (mm) y la evapotranspiración potencial (ET_P , mm/ha). La ET_P de cada día se calculó con la fórmula de Priestley and Taylor, 1972 [Ecuación 1].

$$ET_P \left(\frac{mm}{ha \ d} \right) = 0.52 \times RFA_{AC} \times [(T_M \times 0.01) + 0.47] \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde RFA_{AC} es la radiación acumulada de cada día (MJ/ha d) y T_M es la temperatura media de cada día (°C).

Registro de fenología del cultivo

En el estadio de V_{11} se marcó en los surcos 2^{do}, 3^{ro} y 4^{to} de cada parcela un total de cinco plantas aledañas de similar tamaño (estimación visual). En cada planta se registraron los estadios fenológicos V_{15} , R_1 , R_2 y R_6 (Ritchie *et al.*, 1993). Todas las mediciones y análisis realizados sobre el cultivo fueron referidas al período entre V_{15} y R_2 , (ca., período crítico, PC).

Medición de interceptación de la radiación

La fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo ($fRFAi$) se determinó en el estadio R_1 mediante el empleo de un sensor cuántico lineal. En cada parcela, se realizaron mediciones instantáneas de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) mediante un ceptómetro de barra sensorial integradora (marca *Cavadevices*) que consistió en una medición por encima del canopeo (RFA_{TC} ; $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) y cuatro mediciones por debajo de las hojas verdes basales y por sobre las senescentes (RFA_{BC} ; $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$). Todas las mediciones se realizaron en días diáfanos entre las 11:30 y 14:30 hs, ubicando el sensor en forma diagonal a las hileras. Los valores de $fRFAi$ se calcularon a partir la ecuación 2.

$$fRFAi = 1 - \frac{RFA_{BC}}{RFA_{TC}} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

La $fRFAi$ en R_1 se consideró como referencia para todo el PC. La RFA interceptada por el cultivo ($RFAi$, $\mu\text{mol} / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$) se calculó mediante la suma diaria del producto entre RFA_{IN} y $fRFAi$.

Elaboración del modelo alométrico para la estimación del crecimiento y biomasa

La biomasa aérea (BA, g/pl) de todas las plantas marcadas se estimó en V_{15} , R_1 y R_2 por medio de modelos alométricos basados en la relación entre la biomasa de la planta y variables morfométricas (Vega *et al.*, 2001). Para la construcción de los modelos mencionados se cosecharon 48 plantas de tamaño promedio de cada híbrido sobre las cuales se midieron el diámetro de la base del tallo (ϕ , mm), la altura de la planta desde el nivel del suelo hasta la lígula de la última hoja expandida (h, cm) y el máximo diámetro de la espiga (ϕ_E , mm, sólo para R_1 y R_2). Luego de secar las plantas cosechadas durante 96hs en una estufa a 72°C se registró la biomasa vegetativa y la biomasa de la espiga. Las relaciones morfométricas se establecieron

entre el volumen del tallo (cm^3), estimado utilizando la fórmula del cilindro [Ecuación 3] y la biomasa aérea de la planta sin espiga (g/pl) [Ecuación 4], y el diámetro máximo de la espiga (mm) y la biomasa de la espiga en R_1 y R_2 (g) [Ecuación 5] como sigue:

$$v(\text{cm}^3) = \pi \times \left(\frac{\phi_T}{2}\right)^2 \times h \quad [\text{Ecuación 3}]$$

$$\text{Biomasa Vegetativa } \left(\frac{\text{g}}{\text{pl}}\right) = m \times v \quad [\text{Ecuación 4}]$$

$$\text{Biomasa de la espiga } \left(\frac{\text{g}}{\text{espiga}}\right) = d \times e^{f \times \phi_E} \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde u es el volumen del tallo (cm^3), ϕ_T y ϕ_E son el diámetro del tallo y la espiga respectivamente (mm), h es la altura de la planta (cm), $\pi=3.14$. Por último, m , d y f son parámetros ajustados para cada ecuación.

Los modelos ajustados entre la biomasa de planta y espiga y las variables morfométricas fueron siempre significativos ($P < 0.05$), se esquematizan en las Figuras S1, S2 y S3; y los parámetros se resumen en la Tabla 1. Sobre las 5 plantas marcadas se midieron las mismas variables morfométricas en los diferentes estados ontogénicos permitiendo junto al uso de los modelos obtenidos calcular las biomásas vegetativas y reproductivas de forma no destructiva.

Cuadro 1: Resumen de parámetros de modelos alométricos del crecimiento *vegetativo*, de la espiga apical (*Espiga 1*) y sub-apical (*Espiga 2*) para cuatro híbridos *Dekalb*: *DK692*, *DK70-10*, *DK72-50* y *DK72-10*. Los parámetros m , d y f corresponden a las ecuaciones 3 y 4. R^2 es el coeficiente de regresión y n el número de datos utilizados para el ajuste. Los datos corresponden al Exp.R y Exp.S.

MODELO ALOMÉTRICO		DK692	DK70-10	DK72-50	DK72-10
VEGETATIVO (<i>S-R₂</i>)	m	0.157	0.144	0.153	0.132
	R^2	88.5	87.90	86.70	91.2
	n	159	159	159	161
ESPIGA 1 (<i>APICAL</i>)	d	0.963	0.667	0.835	0.429
	f	0.0741	0.0796	0.0745	0.0875
	R^2	61.0	62.0	55.0	53.0
	n	47	46	48	50
ESPIGA 2 (<i>SUB-APICAL</i>)	d	0.0032	0.0559	0.2511	0.0232
	f	0.1921	0.1246	0.0925	0.1391
	R^2	54.0	11.00	66.00	81.0
	n	25	21	22	21

Con las biomásas calculadas utilizando los modelos alométricos, se estimó la tasa de crecimiento de la planta (TCP_{PC} , g/pl d) y de la espiga durante el período crítico (TCE_{PC} , g/espiga d) a través de la pendiente de la regresión lineal ajustada a la evolución de la biomasa de la planta o de la espiga apical durante el PC, respectivamente. La biomasa de la espiga en V15 fue considerada cero (Otegui and Bonhomme, 1998).

Cálculo de la eficiencia en el uso de la radiación

La eficiencia en el uso de la radiación del período crítico (EUR_{PC} , g/MJ) se calculó como el cociente entre la biomasa aérea acumulada por el cultivo (g/m^2) y la RFAi acumulada (MJ/m^2) durante dicho período, cuantificado en las 5 plantas marcadas [Ecuación 6].

$$EUR_{PC} \left(\frac{g}{MJ} \right) = \frac{\text{Biomasa del cultivo ACUMULADA} \left(\frac{g}{m^2} \right)}{RFAi_{ACUMULADA} \left(\frac{MJ}{m^2} \right)} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Componentes del rendimiento

En madurez fisiológica (R_6), las plantas marcadas fueron cosechadas y fraccionadas en tres partes (i) hojas, tallos y panoja; (ii) espiga apical (E_1) y (iii) espiga sub-apical (E_2). Cada fracción se secó durante 96hs en una estufa a 72°C y su peso se registró individualmente. La biomasa por planta (BP, g/pl) resultó de la sumatoria del peso de las tres fracciones. Se registró el número de granos de cada espiga (NGE_1 y NGE_2 , granos/espiga) a partir del producto del número de hileras y NG/hilera. El número de granos de la planta (NGP, granos/pl) se calculó como la sumatoria de NGE_1 y NGE_2 . El rendimiento por planta (RP, g/pl) se calculó sumando el peso de ambas espigas para las 5 planta marcadas. El rendimiento por área (RA, g/m^2) se calculó mediante el producto de RP (g/pl) y la densidad de siembra (pl/m^2). El índice de cosecha se calculó como el cociente entre el RP y BP.

Cálculo de los indicadores de prolificidad

La prolificidad de las plantas se calculó mediante dos metodologías diferentes. La primera (Prolificidad I) es la más utilizada e indica el número promedio de espigas por planta de un cultivo. Se calculó mediante el cociente entre la sumatoria de espigas ($E_1 + E_2$) de las 5 plantas marcadas y el número de plantas marcadas (5 plantas). El segundo indicador de prolificidad (Prolificidad II) se refiere a la contribución relativa de la espiga 2 en función de la espiga 1. Se calculó mediante el cociente entre el peso de E_2 y E_1 , multiplicado por 100.

Cálculo de la eficiencia de partición

La partición de biomasa a las espigas durante el período crítico y para cada planta marcada se estimó mediante un modelo lineal [Ecuación 7].

$$TCE_{PC} \left(\frac{g}{d} \right) = (q \times TCP_{PC}) + s \quad \text{[Ecuación 7]}$$

donde q es el índice de partición e indica la cantidad de biomasa que se destina a las espigas (E_1 y E_2); s es la ordenada al origen con valores negativos (g/d).

También se calculó el índice de partición de forma independiente para la espiga apical (E_1) y subapical (E_2) utilizando el modelo de la Ecuación 8 que contempla umbrales y valores críticos donde cambian los índices de partición.

$$TCE_{PC} = (t_1 \times TCP_{PC}) + s \{ \text{para } TCP_{PC} < TCP_{Crítico} \} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

$$TCE_{PC} = (t_1 \times TCP_{Crítico}) + [t_2 \times (TCP_{PC} - TCP_{Crítico})] + s \{ \text{para } TCP_{PC} > TCP_{Crítico} \}$$

donde t es el índice de partición e indica la cantidad de biomasa que se destina a las espigas (E_1 o E_2); $TCP_{Crítico}$ (g/planta d) es el valor de TCP_{PC} en el que cambia el índice de partición (de t_1 a t_2).

Análisis de las relaciones funcionales

A partir de la ecuación 9 (Echarte *et al.*, 2006; Ciancio *et al.*, 2016; Rotili *et al.*, 2021) se calcularon diferentes relaciones funcionales de la planta: (i) NGE₁ en función de TCP_{PC}; (ii) NGT en función de TCP_{PC}; (iii) NGE₁ en función de TCE_{1-PC} y (iv) NGE₂ en función de TCE_{2-PC}.

$$y = a \times \left(1 - \exp\left(-\frac{(x-b)}{c}\right)\right) \quad x > b \quad \text{[Ecuación 9]}$$

donde a es el número potencial de granos, b es el umbral de la tasa de crecimiento a partir del cual comienzan a fijarse granos y c es el coeficiente de curvilinealidad.

Análisis estadístico

El efecto de los tratamientos y sus interacciones fue evaluado a través de los experimentos mediante análisis de varianza respetando el diseño del experimento (parcelas divididas) utilizando *Infostat*. Para comparar las medias se utilizó el método de diferencias mínimas significativas (DMS) de *Fisher* con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Para graficar y analizar los ajustes de los modelos y relaciones funcionales se utilizó el *GraphPad Prism*.

RESULTADOS

Descripción de las condiciones meteorológicas durante los experimentos

En la Tabla 2 se resumen las condiciones meteorológicas de ambos experimentos durante el total del ciclo (desde la siembra hasta la cosecha) y el período crítico (V₁₅-R₂).

Tabla 2: Condiciones meteorológicas durante el Exp.R y Exp.S en la campaña 2014-2015 en Pergamino, provincia de Buenos Aires. Se detallan dos períodos: el *ciclo total* desde la siembra a la cosecha y el *período crítico* centrado en la floración (V₁₅-R₂). Las variables son: radiación acumulada (*RAD.ACUM.*), temperatura promedio (*TEMP.PROM.*), días de golpes térmicos (*GOLPES TERM.*), precipitaciones acumuladas (*PRECIP.ACUM.*) y evapotranspiración potencial (*ET_p ACUM.*).

PERÍODO	RAD.ACUM. (MJ/m ²)	TEMP. PROM. (°C)	GOLPES TERM. (días T>35°C)	PRECIP. ACUM. (mm)	ET _p ACUM. (mm/ha)
Ciclo total	3249.6	21.6	5	608.2	1166.2
Período crítico	837.4	22.3	1	214.0	302.5

El Exp.R tuvo una continua provisión de agua mediante riego suplementario, en cambio el Exp.S estuvo expuesto a la ocurrencia de lluvias. Las precipitaciones totales acumuladas durante todo el ciclo del cultivo fueron de 608.2 mm y de 214mm durante el período crítico. Los valores de precipitaciones fueron normales para los registros históricos de lluvia de la región y por tratarse de un año NIÑO. Sin embargo, la provisión de agua por lluvias no fue suficiente como para satisfacer la demanda atmosférica acumulada (ET_p acumulada) de 1166.2 mm/ha y 302.5 mm/ha para los mismos períodos. Los eventos de precipitaciones ocurrieron de forma frecuente a lo largo de un ciclo que se caracterizó por la alta nubosidad. La RFA_{AC} de todo el ciclo fue de 3249.6 MJ/m² y en el período crítico de 837 MJ/m². Las temperaturas de ambos períodos fueron similar y templadas (21.6°C y 22.3°C respectivamente), y la ocurrencia de golpes térmicos baja sin causar estreses.

Rendimiento y sus componentes

El RA respondió significativamente a la densidad de siembra de forma similar en todos los híbridos (Tabla 3). El aumento del RA con la densidad de siembra alcanzó un valor máximo a 12 pl/m², aunque la respuesta deja de ser significativa a partir de las 6 pl/m². El aumento de la densidad de siembra aumenta la *f*RFAi del cultivo ingresando más energía en el sistema que podría ser convertida en granos (Monteith *et al.*, 1977). El aumento en la densidad de siembra también causa un aumento en la competencia de recursos entre las plantas del cultivo (Otegui *et al.*, 1995) y eso se refleja en la disminución del RP ($p < 0.01$). Las reducciones de RP promedio desde 2 a 18 pl/m² fue de un 77%. La BP tuvo una respuesta a la densidad similar al RP mientras que el IC se mantuvo constante (Tabla 3). Solamente a densidades de 18pl/m², el IC, cayó de forma significativa debido a que la alta competencia entre plantas causó la esterilidad de alguna de ellas. De los componentes numéricos, fue el NGP, el que respondió a la densidad y tuvo una interacción significativa con los híbridos sin que el PG se viera afectado.

Tabla 3: Rendimiento por área (RA), rendimiento por planta (RP), biomasa por planta (BP), índice de cosecha (IC), número de granos por planta (NGP) y peso de los granos (PG) para cuatro híbridos (DK692, DK70-10, DK72-50 y DK72-10) sembrados a cuatro densidades de siembra (2, 6, 12 y 18 pl/m²). Los datos corresponden al Exp.R. Letras distintas indican valores significativamente diferentes para la prueba DMS de Fisher. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, ns=no significativo. H=efecto híbrido, D=efecto densidad, H*D=efecto interacción.

HÍBRIDO	DENSIDAD (pl/m ²)	RA (g/m ²)	RP (g/pl)	BP (g/pl)	IC	NGP (granos/pl)	PG (g/grano)
DK692	2	571.1 a	285.6 a	488.8 a	0.59 a	1103.0 a	3.86 a
	6	1261.8 b	210.3 b	372.2 b	0.57 ab	898.4 d	4.28 a
	12	1468.8 b	122.4 c	229.8 c	0.53 ab	492.2 f	4.02 a
	18	1240.1 b	68.9 d	136.0 d	0.51 b	298.1 g	4.33 a
DK70-10	2	621.7 a	310.9 a	577.8 a	0.54 a	1199.9 b	3.86 a
	6	1357.0 b	226.2 b	405.7 b	0.56 a	879.1 d	3.90 a
	12	1496.7 b	124.7 c	243.4 c	0.52 a	537.6 f	4.30 a
	18	1330.2 b	73.9 d	143.1 d	0.52 a	320.9 g	4.37 a
DK72-50	2	622.3 a	311.1 a	538.6 a	0.58 a	1289.7 c	4.16 a
	6	1199.7 b	200.0 b	384.1 b	0.52 a	696.3 e	3.48 a
	12	1288.9 b	107.4 c	223.1 c	0.49 ab	473.1 f	4.46 a
	18	1072.7 b	59.6 d	127.1 d	0.43 b	267.3 g	4.51 a
DK72-10	2	583.6 a	291.8 a	564.8 a	0.52 a	1216.4 bc	4.17 a
	6	1241.4 b	206.9 b	407.1 b	0.51 a	727.4 e	3.52 a
	12	1574.3 b	131.2 c	273.5 c	0.49 a	513.1 f	3.90 a
	18	1260.1 b	70.0 d	170.7 d	0.40 b	305.9 g	4.31 a
	H	ns	ns	**	**	ns	ns
	D	**	**	**	ns	***	ns
	HxD	ns	ns	ns	ns	**	ns

La prolificidad como estrategia de rendimiento

Las plantas de maíz poseen una inflorescencia masculina (panoja) y una, o más, inflorescencias femeninas (espiga) supeditadas a una prioridad secundaria. Una vez que los recursos para el desarrollo de la panoja están garantizados, la planta comienza a desarrollar espigas en sus axilas de manera basípeta (desde arriba hacia abajo) comenzando por la hoja número 9 aproximadamente. Tradicionalmente la prolificidad se define como la cantidad de espigas promedio que tienen las plantas de un cultivo (Prolificidad I en Tabla 4). La prolificidad I disminuye con la densidad de siembra conforme a lo esperado debido a la menor cantidad de recursos disponibles por planta con una interacción significativa entre la densidad y el híbrido (Tabla 4). A densidades de 2pl/m² los cuatro híbridos presentan 2 espigas promedio por planta. A partir de la densidad de 12 pl/m² la prolificidad I cobra valores de 1 para los cuatro híbridos.

Sin embargo, a densidad de 6 pl/m² los híbridos DK692 y DK70-10 resultaron más prolíficos (1.93 y 1.86 respectivamente) que DK72-50 y DK72-10 (ambos 1.29).

Tabla 4: *Prolifricidad I* (cantidad promedio de espigas por planta en un cultivo) y *II* (contribución al rendimiento de la espiga sub-apical relativo a la espiga apical) para cuatro híbridos (DK692, DK70-10, DK72-50 y DK72-10) sembrados a cuatro densidades de siembra (2, 6, 12 y 18 pl/m²). Los datos corresponden al Exp.R. Letras distintas son valores significativamente diferentes en test *LSD* de *Fisher*. * valor $p < 0.05$, ** valor $p < 0.01$, ns= no significativo. *H*= efecto híbrido, *D*=efecto densidad, *H*D*=efecto interacción.

HÍBRIDO	DENSIDAD (pl/m ²)	PROLIF. I	PROLIF. II (%)
DK692	2	2.00 <i>a</i>	93.47 <i>a</i>
	6	1.93 <i>a</i>	68.36 <i>b</i>
	12	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>c</i>
	18	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>c</i>
DK70-10	2	2.00 <i>a</i>	89.44 <i>a</i>
	6	1.86 <i>a</i>	44.67 <i>d</i>
	12	1.07 <i>b</i>	5.36 <i>c</i>
	18	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>d</i>
DK72-50	2	2.00 <i>a</i>	94.74 <i>a</i>
	6	1.29 <i>c</i>	6.83 <i>c</i>
	12	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>c</i>
	18	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>c</i>
DK72-10	2	2.00 <i>a</i>	73.13 <i>b</i>
	6	1.29 <i>c</i>	16.96 <i>d</i>
	12	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>c</i>
	18	1.00 <i>b</i>	0.00 <i>c</i>
	<i>H</i>	**	***
	<i>D</i>	***	***
	<i>HxD</i>	**	***

La prolificidad II (Tabla 4) hace referencia a la contribución relativa de la segunda espiga en comparación a la primera. La prolificidad I y II comparten las mismas tendencias y ambas tienen una interacción densidad x híbrido estadísticamente significativa (Tabla 4). Analizando comparativamente ambas variables podemos notar que aún con el mismo valor de prolificidad I el aporte de la espiga sub-apical (prolificidad II) no es igual en todos los híbridos. Esto denota las distintas estrategias que tienen los híbridos para generar rendimiento en sus diferentes espigas.

Índice de partición: lo que se llevan las espigas

Durante el período crítico las plantas crecen a una tasa (TCP_{PC}) y parte de esa biomasa corresponde al crecimiento de las espigas (TCE_{PC}). El índice de partición indica la proporción del crecimiento de la planta que se destina a la espiga y se refleja en las pendientes que relacionan ambas variables (Figura 2). Los resultados muestran que los cuatro híbridos presentan un mismo índice de partición hacia la totalidad de las estructuras de cosecha (Fig. 2 a, c, e y g) que se mantienen cercanos a la referencia de 0.75. Los valores exactos de cada pendiente se encuentran en la tabla S1. Sin embargo, si observamos independientemente la partición a cada una de las espigas las pendientes cambian en función del crecimiento de la planta por encima o debajo de un valor crítico ($TCP_{Crítico}$) (Fig. 2- b-, d-, f- y h-). A bajas TCP_{PC} , solo se evidencia crecimiento de la espiga 1 (TCE_1). Cuando las plantas del cultivo se encuentran con una mayor oferta de recursos (e.g., menor densidad o riego) aumentan su TCP_{PC} y la espiga 2 comienza a crecer también (TCE_2). El valor umbral de TCP_{PC} ($TCP_{Crítico}$) para el comienzo de TCE_2 es crítico para la espiga 1 ya que altera su partición (i.e., cambio de pendiente). No todos los híbridos poseen un mismo valor de $TCP_{Crítico}$, siendo 3.0, 3.3, 2.8 y 4.4 para DK692, DK70-10, DK72-50 y DK72-10 respectivamente (Tabla S1), ni tampoco es similar el índice de partición de la espiga 2 una vez superado. Ambos valores reflejan la estrategia de cada híbrido para generar rendimiento por planta a pesar de tener una partición total similar (Fig. 2a, c, e y g).

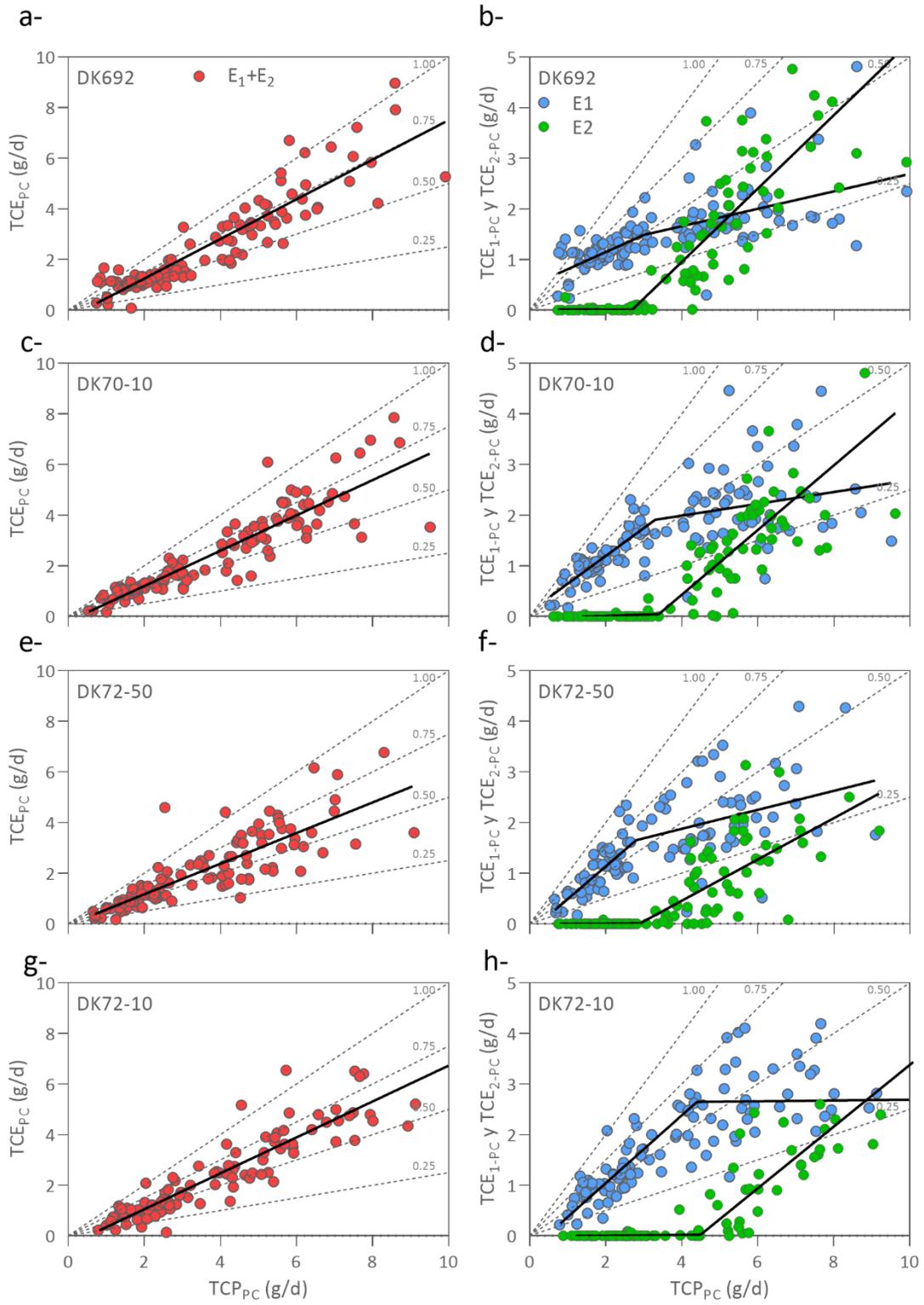


Figura 2: Partición de biomasa a las espigas durante el período crítico de los cuatro híbridos: DK692 (*a* y *b*), DK70-10 (*c* y *d*), DK72-50 (*e* y *f*) y DK72-10 (*g* y *h*). *a*, *c*, *e* y *g* corresponden a la TCE_{PC} total (E_1+E_2). *b*, *d*, *f* y *h* corresponde a la partición independiente de TCE_{1-PC} y TCE_{2-PC}. Los parámetros [Ecuación 7 y 8] se detallan en la Tabla S1. En líneas punteadas están las referencias de *iso*-partición (0.25, 0.5, 0.75 o 1). Los datos corresponden al Exp.R y Exp.S.

Captura de radiación y su eficiencia de uso durante el período crítico

El largo de ciclo y las etapas fenológicas fueron similares entre los híbridos (E-R1: 779-830 °Cd y R1-R6: 739-825 °Cd, valores promedios entre experimentos e híbridos).

La eficiencia de captura de radiación (*fRFAi*) no evidenció diferencias genotípicas durante el período crítico (Tabla 5), determinando niveles de radiación interceptada similares entre los híbridos. En todos los casos existió una respuesta significativa a la densidad de siembra con un aumento de *fRFAi* conforme al aumento de la densidad. A modo general, todos los híbridos alcanzaron el máximo *fRFAi* a 12 pl/m². En cambio, a densidad de 2 pl/m² tuvieron la mitad (o menos) de la eficiencia de intercepción debido a que la cantidad de plantas limitaba el índice de área foliar del cultivo (Tabla 5).

Tabla 5: Eficiencia de intercepción radiación (*fRFAi*) y eficiencia en el uso de la radiación (*EUR*) durante el período crítico para cuatro híbridos (*DK692*, *DK70-10*, *DK72-50* y *DK72-10*) sembrados a cuatro densidades de siembra (2, 6, 12 y 18 pl/m²). Los datos corresponden al Exp.R. Letras distintas son valores significativamente diferentes en test *LSD* de Fisher. * valor $p < 0.05$, ** valor $p < 0.01$, ns= no significativo. *H*= efecto híbrido, *D*=efecto densidad, *H*D*=efecto interacción.

HÍBRIDO	DENSIDAD (pl/m ²)	fRFAi (0-1)	EUR (g/MJ)
DK692	2	0.44 <i>a</i>	1.08
	6	0.79 <i>b</i>	1.40
	12	0.94 <i>c</i>	1.01
	18	0.95 <i>c</i>	1.30
DK70-10	2	0.34 <i>a</i>	1.28
	6	0.74 <i>b</i>	1.52
	12	0.93 <i>c</i>	1.34
	18	0.95 <i>c</i>	1.24
DK72-50	2	0.39 <i>a</i>	1.13
	6	0.71 <i>bc</i>	1.38
	12	0.91 <i>cd</i>	1.35
	18	0.96 <i>d</i>	1.05
DK72-10	2	0.38 <i>a</i>	1.42
	6	0.68 <i>b</i>	1.54
	12	0.84 <i>c</i>	1.43
	18	0.92 <i>c</i>	1.36
	<i>H</i>	<i>ns</i>	*
	<i>D</i>	**	<i>ns</i>
	<i>HxD</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

Una vez que la radiación fue interceptada, la eficiencia (EUR) con la que los híbridos la utilizaron, difirió significativamente mientras que fue similar entre las distintas densidades (Tabla 5). Los híbridos DK70-10 y DK72-10 presentaron los mayores valores promedio de EUR.

Granos fijados en cada planta y en cada espiga

Para conocer la eficiencia con la que fija granos una planta (E_1 y E_2) o una espiga (E_1 o E_2) establecimos relaciones funcionales entre el número de granos y la tasa de crecimiento. La Tabla 6 resume los parámetros de las siguientes relaciones funcionales durante el período crítico: (i) NGE_1 en función de TCP_{PC} ; (ii) NGT en función de TCP_{PC} ; (iii) NGE_1 en función de TCE_{1-PC} y (iv) NGE_2 en función de TCE_{2-PC} .

Tabla 6: Resumen de parámetros de las relaciones funcionales para la fijación de granos: NGE_1 en función de TCP_{PC} ; NGT en función de TCP_{PC} ; NGE_1 en función de TCE_{1-PC} y NGE_2 en función de TCE_{2-PC} ; para cuatro híbridos Dekalb: DK692, DK70-10, DK72-50 y DK72-10. Los parámetros *a*, *b* y *c* corresponden a la ecuación 9. R^2 es el coeficiente de regresión y *n* el número de datos utilizados para el ajuste. Los datos corresponden al Exp.R y Exp.S.

RELACIÓN FUNCIONAL	HÍBRIDO	<i>a</i> (granos)	<i>b</i> (g/pl o esp)	<i>c</i> (granos/g)	<i>R</i> ² (%)	<i>n</i> (datos)
NGE ₁ vs. TCP _{PC}	DK692	575.3	0.39	1.37	68.0	108
	DK70-10	626.6	0.52	1.32	76.5	112
	DK72-50	694.6	0.44	1.88	73.1	109
	DK72-10	698.4	0.47	1.86	72.1	112
NGT vs. TCP _{PC}	DK692	1260.0	0.56	3.46	80.6	108
	DK70-10	1610.0	0.45	5.07	83.2	112
	DK72-50	2878.0	0.17	13.31	75.8	109
	DK72-10	1403.0	0.50	4.77	80.2	112
NGE ₁ vs. TCE _{1-PC}	DK692	627.6	0.34	0.75	51.2	108
	DK70-10	714.3	0.00	1.20	58.3	112
	DK72-50	746.2	0.02	1.26	46.4	109
	DK72-10	762.6	0.02	1.36	74.0	112
NGE ₂ vs. TCE _{2-PC}	DK692	477.8	0.00	0.78	23.9	56
	DK70-10	553.8	0.00	0.86	14.8	53
	DK72-50	605.8	0.51	0.65	59.2	47
	DK72-10	483.3	0.11	0.51	48.4	38

El NGT, máximo número de granos por planta (parámetro “a”) lo alcanzó el híbrido DK72-50 con valores de 2878 granos totales, diferenciándose de DK70-10, DK72-10 y DK692 los cuales arrojaron valores inferiores y semejantes (1610, 1403 y 1260 granos, respectivamente) (Tabla 6). El modelo ajustado para DK72-50 estaría sobreestimando el NGT debido, posiblemente, a la dispersión de los datos a altas TCP_{PC} (Fig. 3C). Respecto a los umbrales a partir de los cuales comienza la fijación de granos (parámetro “c”), el híbrido DK692 presentó el valor más bajo (3.46 g/d) (Tabla 6).

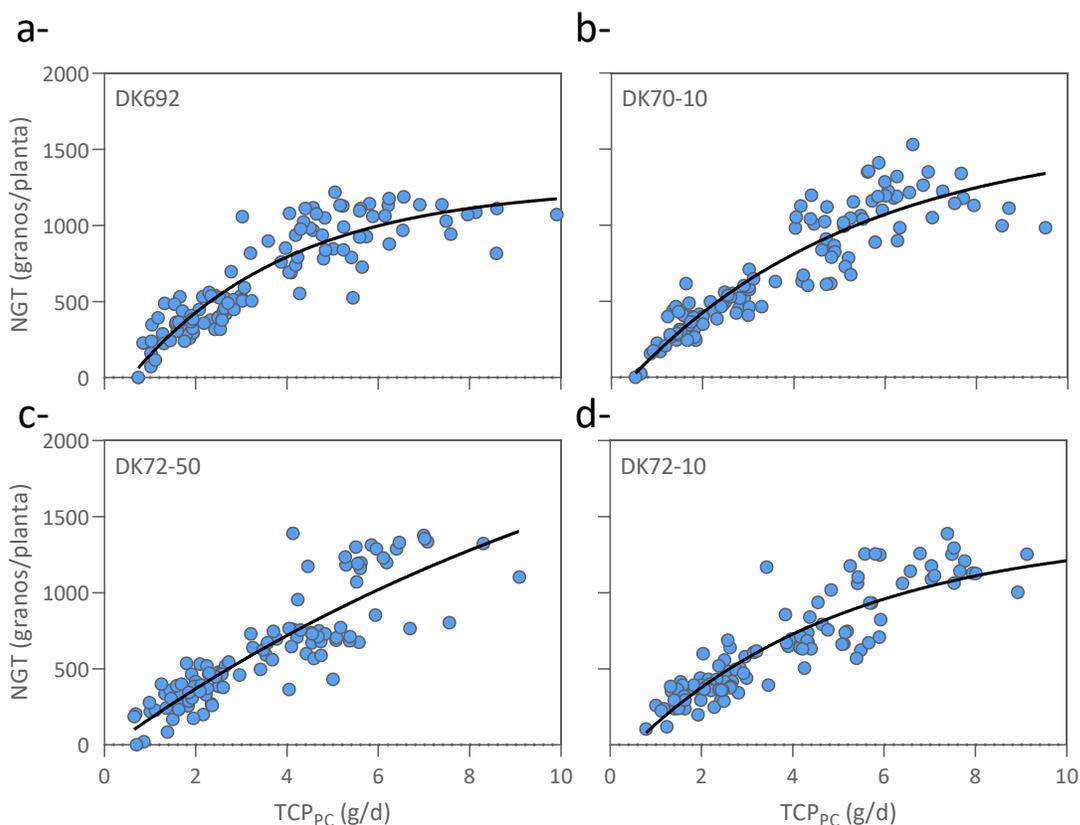


Figura 3: Número de granos totales por planta (NGT) en función de la tasa de crecimiento de la planta durante el período crítico (TCP_{PC}). Los parámetros del modelo [Ecuación 9] se detallan en la Tabla 6. Cada figura corresponde a un híbrido diferente: a-DK692, b-DK70-10, c-DK72-50 y d-DK72-10.

La eficiencia reproductiva muestra la relación entre el NGE_1 y NGE_2 en función de la TCE_{1-PC} y TCE_{2-PC} respectivamente (Fig. 4). Respecto a NGE_1 en función de la TCE_{1-PC} se observa que DK692 tiene el menor valor de máximos granos totales (627 granos) pero a su vez tiene el menor umbral para comenzar a fijarlos (0.75 g/d) (Fig. 4- a). El resto de los híbridos arrojaron valores mayores de granos máximos totales en la E_1 , siendo de 714, 746 y 762 granos para DK70-10, DK72-50 y DK72-10, respectivamente (Tabla 6). Estos tres híbridos también mostraron valores similares de umbrales para la fijación de granos en dicha espiga, siendo de 1.20, 1.26 y 1.36, respectivamente.

DK692 y DK72-10 mostraron una eficiencia reproductiva similar (Fig. 4e y h) en el valor de máximos granos totales (477 y 483 granos respectivamente) y umbral para fijar la espiga sub-apical (0.78 y 0.51 g/d respectivamente). Los datos de E₂ del DK72-50 vuelven a mostrar cierta dispersión con patrones de ajustes diferentes al resto de los híbridos (Figura 3g). Probablemente, la dispersión de puntos en ese híbrido corresponda a los valores de riego y seco; y que la densidad de plantas dentro de ellos no generó suficiente variabilidad para ajustar un buen modelo.

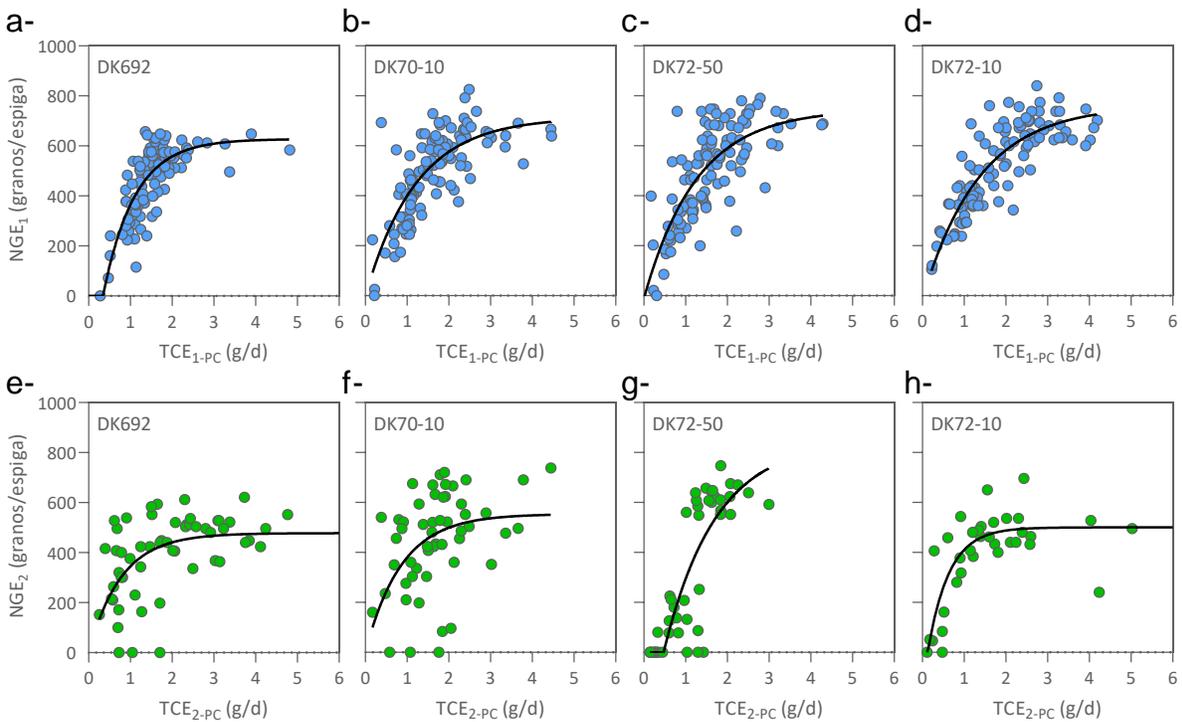


Figura 4: Eficiencia reproductiva de la espiga 1 (a-, b-, c- y d-) y espiga 2 (e-, f-, g- y h-) para cuatro híbridos *Dekalb*: a- y e- DK692, b- y f- DK70-10, c- y g- DK72-50 y d- y h- DK72-10. Los parámetros del modelo [Ecuación 9] se detallan en la Tabla 6.

DISCUSIÓN

Conocer el comportamiento de los híbridos en diferentes ambientes y su estrategia para generar rendimiento en grano es una información crucial para realizar recomendaciones exitosas a los productores de maíz. La siembra tardía y la expansión del área sembrada de maíz por fuera de la zona núcleo plantearon el desafío de aumentar el conocimiento del comportamiento de los híbridos. Los resultados generados en este trabajo acerca de los componentes numéricos, determinantes ecofisiológicos y relaciones funcionales para la generación de rendimiento se complementan a una amplia red de la compañía *Bayer Crop Science* de más 500 ensayos distribuidos en todas las zonas donde se produce maíz en Argentina. Ambas informaciones elevan la calidad de las recomendaciones, que se transmiten con actividades de extensión o herramientas tecnológicas como CULTIVIO.

Los resultados descriptos pertenecen a ambientes favorables para la expresión de la potencialidad del rendimiento de cada genotipo (Exp.R, Tabla 3). El Exp.S (secano) nos sirvió para generar variabilidad de TCP_{PC} para establecer adecuadas relaciones funcionales. El rendimiento potencial de los cuatro híbridos analizados no difiere significativamente al considerar las situaciones evaluadas (Tabla 3), resultados tal vez esperables por tratarse de híbridos de alto potencial dentro del portafolio comercial de la compañía *Dekalb*. Las diferencias entre híbridos posiblemente se manifiesten y encuentren al someterlos a situaciones edafo-climáticas diferentes, donde cada genotipo evidenciará sus estrategias de comportamientos ante tales situaciones (Hernández *et al.*, 2014).

Diferencias en las densidades de siembra mostraron diferencias en la radiación interceptada durante el PC (Tabla 5) debido a la competencia intraespecífica dentro del cultivo

(Duncan, 1958). Esto se traduce en diferencias de rendimiento (Tabla 3) (Monteith *et al.*, 1977), así densidades que tuvieron la menor intercepción de radiación tuvieron menores rendimientos. Esta menor radiación interceptada en el PC afectó en mayor medida al componente de rendimiento número de granos que al peso de estos (Tabla 3) (Andrade *et al.*, 2005). La eficiencia del uso de la radiación (EUR) durante el período crítico (PC) no fue igual para todos los híbridos (Tabla 5). Posiblemente este hallazgo pueda deberse a la arquitectura del canopeo por la que los híbridos más erectófilos distribuyen más uniformemente la luz en los estratos del canopeo (Long *et al.* 2006). La selección artificial modificó la arquitectura de las plantas (Lacasa *et al.*, 2022) aumentando la radiación que alcanza a la hoja de las espiga (principal proveedora de fotoasimilados durante el PC) (Cagnola *et al.* 2021). Esta mejor distribución de la luz aumentó la EUR del cultivo (Messina *et al.* 2022). Híbridos contrastantes en este caso serían DK692 y DK72-10.

La prolificidad es un parámetro que evidenció diferencias entre los híbridos evaluados (Tabla 4), por ejemplo, el DK692 fue el híbrido con mayor prolificidad de tipo I y II. Esta prolificidad se manifestó bajo densidades acordes a las utilizadas en la producción en secano (para el experimento la densidad de 6 pl/m² sería la más cercana a lo utilizada por los productores a campo). En este sentido, DK692 tuvo 93% de plantas con dos espigas, donde los aportes al rinde de las E₂ fueron proporcionalmente similares a los de la espiga principal (68% de prolificidad de tipo II). En contrapartida y bajo la misma situación de densidad solo el 29% de las plantas de DK72-10 manifestaron una segunda espiga, y a su vez esta segunda espiga fue relativamente muy inferior a la espiga principal (16% de prolificidad de tipo II). Cabe destacar que la eficiencia reproductiva de E₂ es la misma para el híbrido DK692 y DK72-10 (Fig. 4- e- y h-), lo que difiere es

la predisposición del genotipo a desarrollar una segunda espiga según las condiciones ambientales y su respectiva contribución (Tabla 4). La figura 2 muestra que el DK692 comienza a fijar una segunda espiga a bajas TCP_{PC} , sin embargo, el DK72-10 sostiene una sola espiga hasta altas TCP_{PC} . La prolificidad en bajas densidades que caracteriza a DK692 lo convierte en un genotipo muy atractivo para planteos productivos de tipo defensivos, sobre todo en aquellas regiones donde las condiciones edafo-climáticas son más riesgosas y por ende deben utilizarse los insumos con mayor precaución (Rotili *et al.*, 2021), al igual que lo haría un híbrido no prolífico de alto rendimiento adaptado a esas condiciones. En contraposición, en ambientes de altos rendimientos el DK72-10 pareciera ser el que mejor comportamiento tendría ya que maximizaría el número de granos totales en una sola espiga (Fig. 3, Tabla 3 y 4).

CONCLUSIÓN

Luego de la caracterización y evaluación de las relaciones funcionales podemos decir que los híbridos tienen rendimiento potencial similar pero diferente estrategia para lograrlo. Los umbrales para las segundas espigas son distintos como también los aportes de la segunda espiga al rendimiento general. Las diferencias en plasticidad pueden posicionar a los híbridos a diferentes ambientes productivos.

Conocer en profundidad los híbridos del portafolio nos otorga herramientas para decidir y argumentar su posicionamiento en el área maicera de la República Argentina.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Andorf C, Beavis WD, Hufford M, Smith S, Suza WP, Wang K, Woodhouse M, Yu J, Lübberstedt T. 2019. Technological advances in maize breeding: past, present and future. *Theoretical and Applied Genetics* **132**, 817–849.

Andrade FH, Sadras VO, Vega CRC, Echarte L. 2005. Physiological Determinants of Crop Growth and Yield in Maize, Sunflower and Soybean. *Journal of Crop Improvement* **14**, 51–101.

Bert FE, Satorre EH, Toranzo FR, Podestá GP. 2006. Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems* **88**, 180–204.

Cagnola JI, Parco M, Rotili DH, Ploschuk EL, Curin F, Amas JI, Luque SF, Maddonni GA, Otegui ME, Casal JJ. 2021. Artificial selection for grain yields has increased net CO₂ exchange of the ear leaf in maize crops. *Journal of Experimental Botany* **72**, No 10, 3902-3913

Cerrudo A, Di Matteo J, Fernandez E, Robles M, Pico LO, Andrade FH. 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop and Pasture Science* **64**, 580–587.

Echarte L, Andrade FH, Sadras VO, Abbate P. 2006. Kernel weight and its response to source manipulations during grain filling in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Research* **96**, 307–312.

Edreira JIR, Carpici EB, Sammarro D, Otegui ME. 2011. Field Crops Research Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research* **123**, 62–73.

FAO-STAT 2022: <https://www.fao.org/faostat>

Florio EL, Mercau JL, Jobbágy EG, Nosoletto MD. 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agricultural Water Management* **146**, 75–83.

Hernández F, Amelong A, Borrás L. 2014. Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal* **106**, 2316–2324.

Lacasa J, Ciampitti IA, Amas JI, Curín F, Luque SF, Otegui ME. 2022. Breeding effects on canopy light attenuation in maize: a retrospective and prospective analysis. *Journal of Experimental Botany* **73**, 1301–1311.

Long SP, Zhu XG, Naidu SL, Ort DR. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields?. *Plant, Cell & Environment* **29**, 315-330.

Maltese NE, Maddonni GA, Melchiori RJM, Ferreyra JM, Caviglia OP. 2020. Crop nitrogen status of early- and late-sown maize at different plant densities. *Field Crops Research* **258**, 107965.

Messina CD, Rotundo J, Hammer GL, Gho C, Reyes A, Fang Y, van Oosterom E, Borrás L, Cooper M. 2022. Radiation use efficiency increased over a century of maize (*Zea mays* L.) breeding in the US corn belt. *Journal of Experimental Botany* **73**, No 16, 5503-5513

Monteith JL, Moss CJ, Cooke GW, Pirie NW, Bell GDH. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*

281, 277–294.

Otegui ME, Andrade FH, Suero EE. 1995. Growth , water use , and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. **40**, 87–94.

Otegui ME, Bonhomme R. 1998. Grain yield components in maize. I- Ear growth and kernel set. *Field Crops Research* **56**, 247–256.

Otegui ME, Riglos M, Mercáu JL. 2021. Genetically modified maize hybrids and delayed sowing reduced drought effects across a rainfall gradient in temperate Argentina. *Journal of Experimental Botany* **72**, 5180–5188.

Parco M, Ciampitti IA, D’Andrea KE, Maddonni GÁ. 2020. Prolificacy and nitrogen internal efficiency in maize crops. *Field Crops Research* **256**, 107912.

Priestley CHB, Taylor RJ. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review* **100**, 81–92.

Ray DK, Mueller ND, West PC, Foley JA. 2013. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE* **8**.

Ritchie SW, Hanway JJ, Benson GO, Herman JC. 1993. How a corn plant develops. Iowa State University Cooperative Extension Service. Special Report 48.

Rotili DH, Giorno A, Tognetti PM, Maddonni GÁ. 2019. Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: Climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agricultural Water Management* **226**, 105761.

Rotili DH, Sadras VO, Abeledo LG, Ferreyra JM, Micheloud JR, Duarte G, Girón P, Ermácora M, Maddonni GÁ. 2021. Impacts of vegetative and reproductive plasticity associated with tillering in maize crops in low-yielding environments: A physiological framework. *Field Crops Research* **265**, 108107.

SAGyP 2022: <https://www.argentina.gob.ar/agricultura/agricultura-ganaderia-y-pesca>

Vega CRC, Andrade FH, Sadras VO. 2001. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. *Field Crops Research* **72**, 163–175.

INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA

Tabla S1: Parámetros de los modelos de ajuste de la Figura 1. E_1+E_2 (Total) corresponde al modelo ajustado considerando ambas espigas utilizando la ecuación 7. Los modelos *Espiga 1* y *Espiga 2* fueron ajustados independientemente para cada espiga (apical y sub-apical respectivamente) mediante la ecuación 8. Los modelos se ajustaron para cuatro híbridos: DK692, DK70-10, DK72-50 y DK72-10. Los datos utilizados corresponden a las cuatro densidades de siembra (2, 6, 12 y 18 pl/m²) de ambos experimentos (Exp.R y Exp.S). q , s , t_1 , t_2 y $TCP_{Crítico}$ son los parámetros de los modelos explicados en la sección de materiales y métodos. R^2 es el coeficiente de regresión y n el número de datos utilizados para el ajuste.

MODELO DE PARTICIÓN		DK692	DK70-10	DK72-50	DK72-10
E₁ + E₂ (TOTAL)	q	0.782	0.697	0.604	0.709
	s	-0.32	-0.19	-0.04	-0.36
	R^2	82.1	81.7	70.1	84.6
	n	111	112	111	111
ESPIGA 1 (APICAL)	t_1	0.338	0.549	0.646	0.697
	$TCP_{Crítico}$	3.0	3.3	2.8	4.4
	t_2	0.172	0.116	0.187	0.007
	s	0.469	0.094	-0.159	-0.297
	R^2	44.4	51.1	49.0	69.3
	n	111	112	111	111
ESPIGA 2 (SUB-APICAL)	t_1	0.000	0.025	0.006	0.008
	$TCP_{Crítico}$	2.7	3.3	2.8	4.4
	t_2	0.724	0.639	0.408	0.610
	s	0.018	0.000	-0.008	-0.014
	R^2	76.9	75.2	62.9	81.7
	n	111	112	111	111

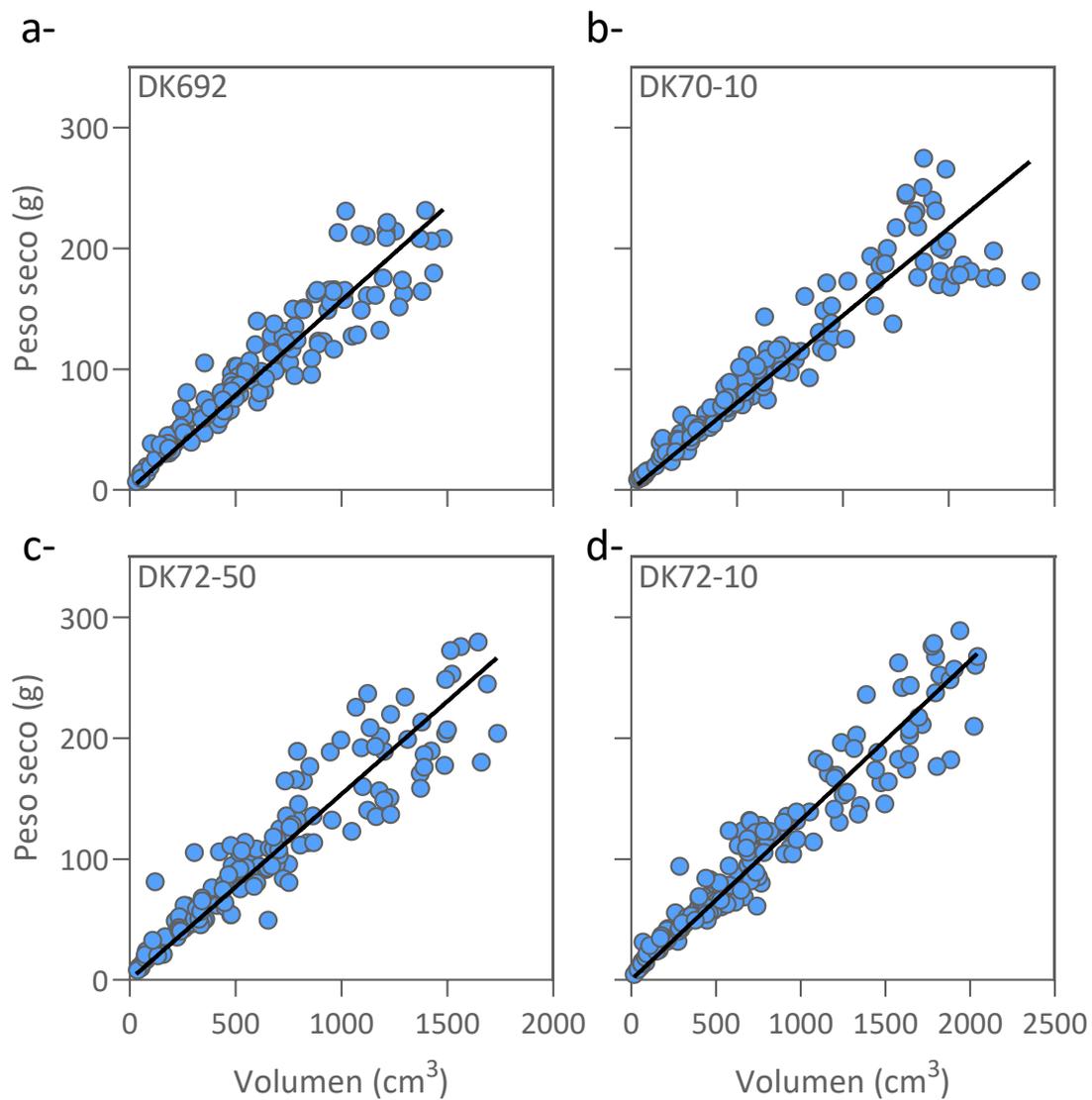


Figura S1: Modelo alométrico para estimación de la biomasa vegetativo (tallos, hojas y panoja) a partir del volumen del tallo. Los parámetros del modelo [Ecuación 3] se detallan en la Tabla 1. Cada figura corresponde a un híbrido diferente: a-DK692, b-DK70-10, c-DK72-50 y d-DK72-10.

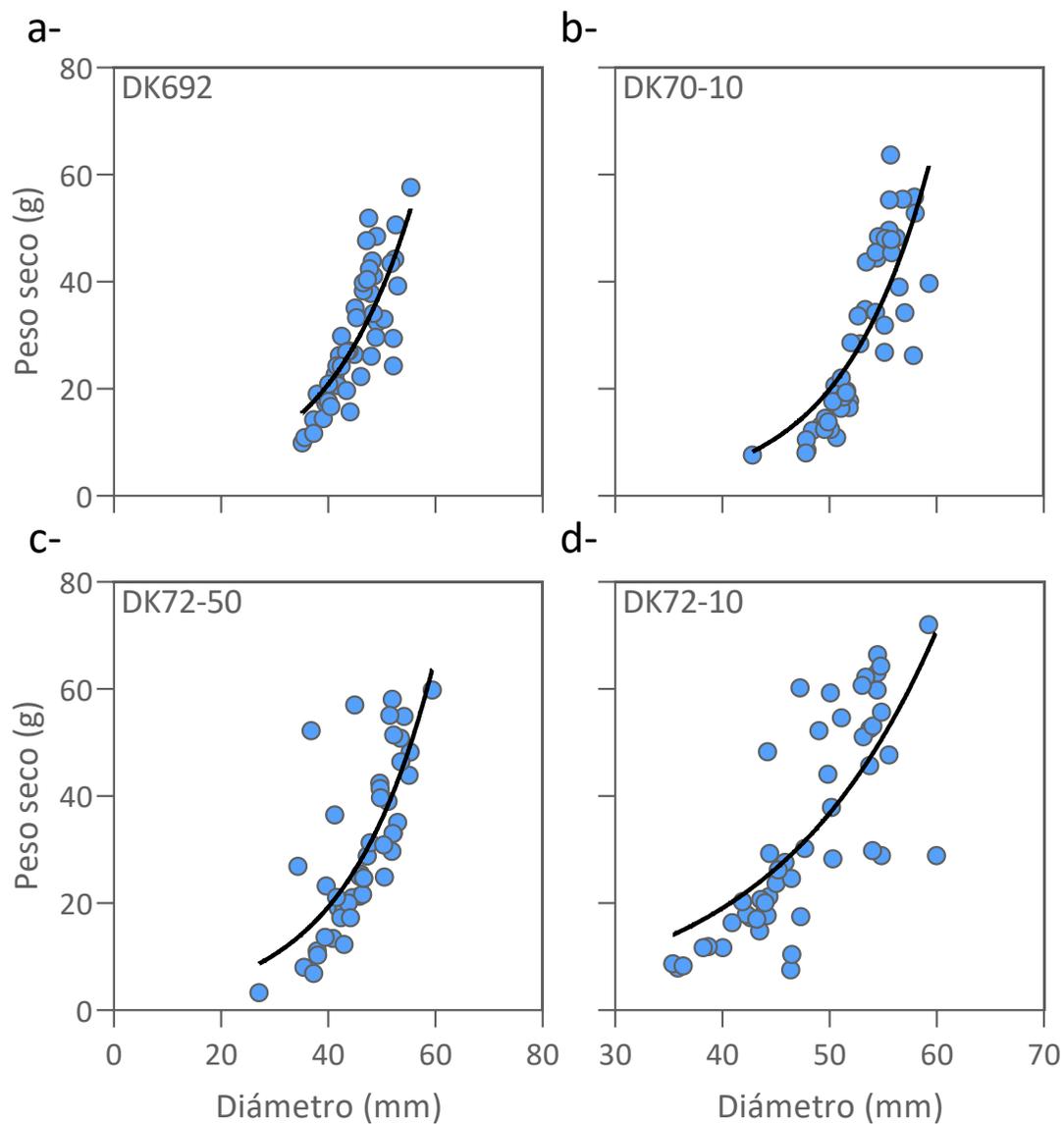


Figura S2: Modelo alométrico para estimación de la biomasa espiga apical (E_1) a partir del diámetro máximo de la espiga. Los parámetros del modelo [Ecuación 4] se detallan en la Tabla 1. Cada figura corresponde a un híbrido diferente: a-DK692, b-DK70-10, c-DK72-50 y d-DK72-10.

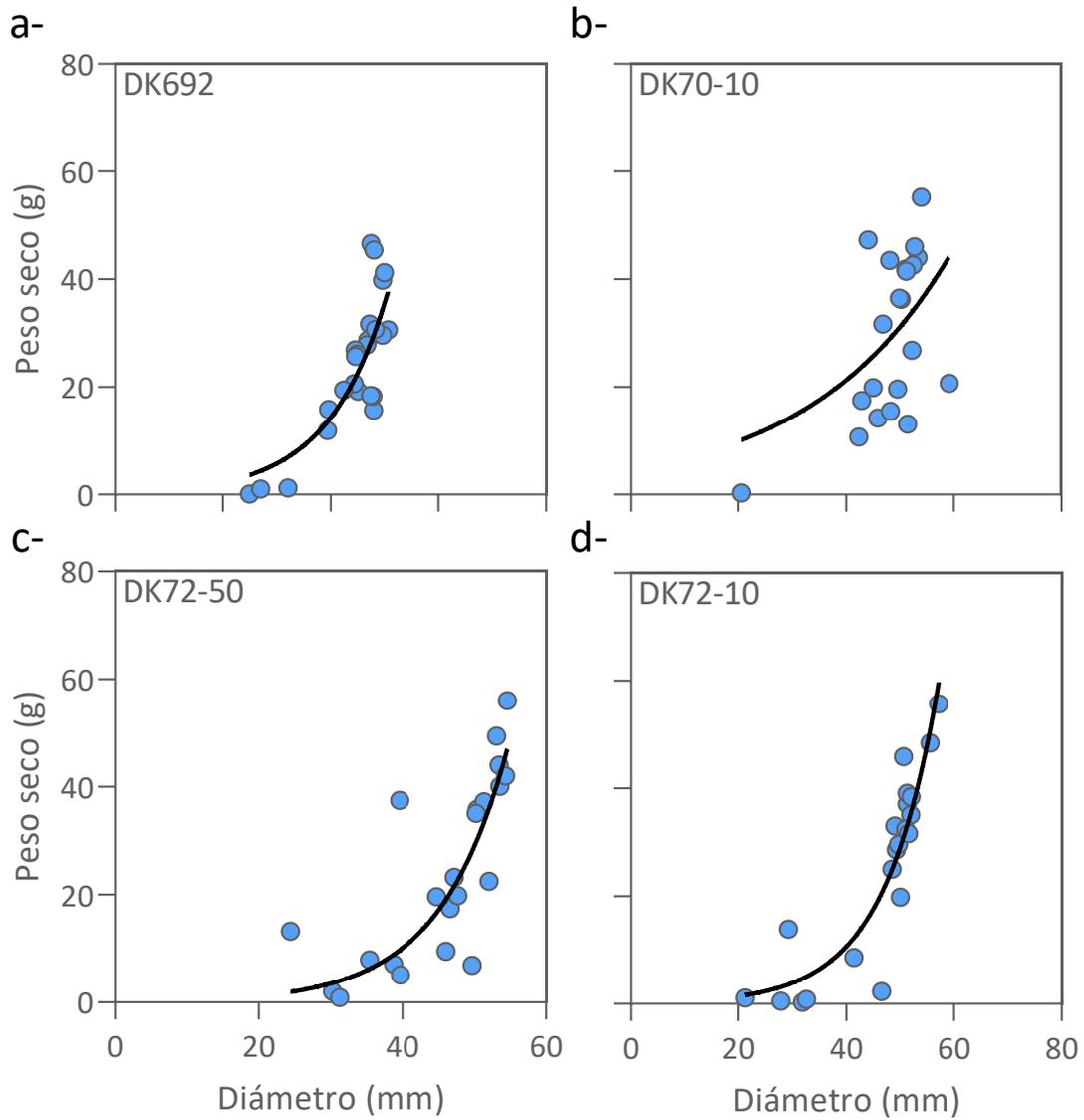


Figura S3: Modelo alométrico para estimación de la biomasa espiga sub-apical (E_2) a partir del diámetro máximo de la espiga. Los parámetros del modelo [Ecuación 4] se detallan en la Tabla 1. Cada figura corresponde a un híbrido diferente: a-DK692, b-DK70-10, c-DK72-50 y d-DK72-10.

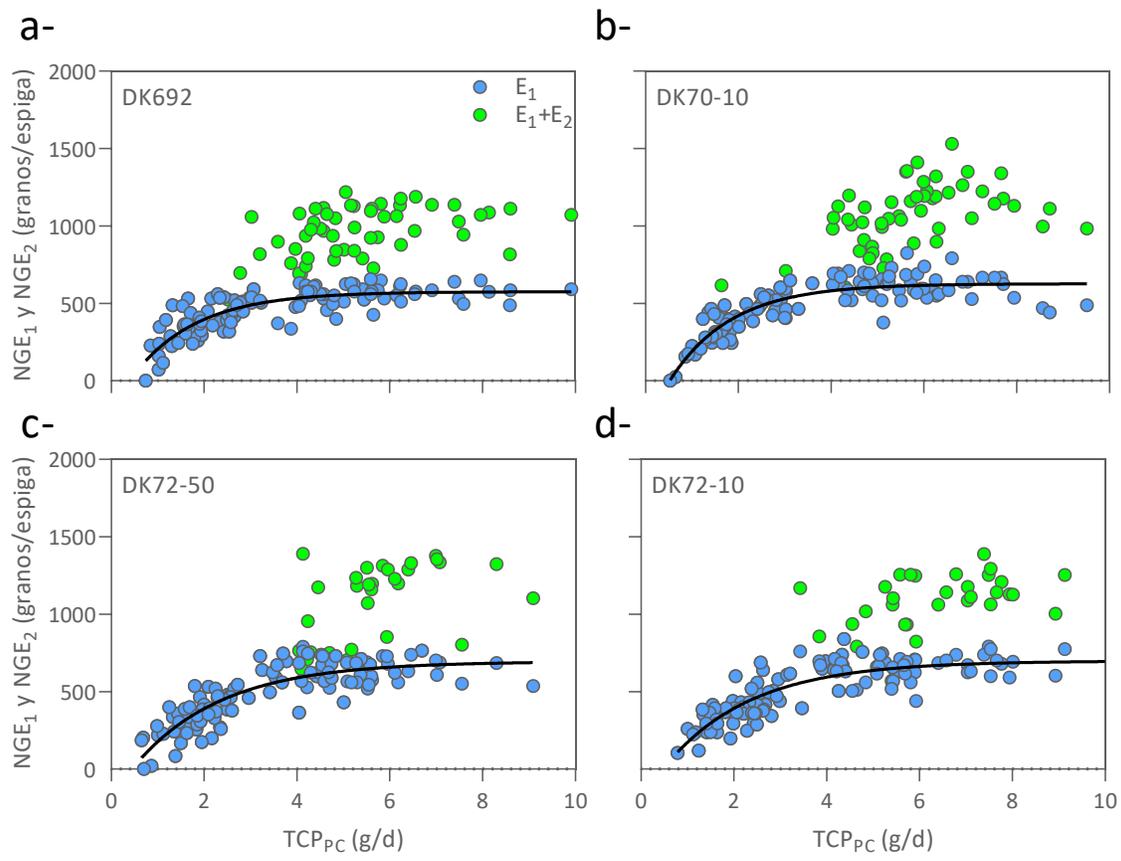


Figura S4: Número de granos de la espiga (NGE) en función de la tasa de crecimiento de la planta durante el período crítico (TCP_{PC}). E₁= Espiga apical, E₂= espiga sub-apical. Los parámetros del modelo [Ecuación 9] se detallan en la Tabla 6. Cada figura corresponde a un híbrido diferente: a-DK692, b-DK70-10, c-DK72-50 y d-DK72-10.

