

# CAPTURA DE RECURSOS Y FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA RADICAL DE MAÍZ

Trabajo Final de Grado  
del alumno



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

Pergamino,.....

**CAPTURA DE RECURSOS Y FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA RADICAL DE  
MAÍZ**

Trabajo Final de Grado

del alumno

**FEDERICO GABRIEL BENAVIDEZ**

Aprobada por el Tribunal Evaluador

(Nombre y Apellido)  
**Evaluador**

(Nombre y Apellido)  
**Evaluador**

(Nombre y Apellido)  
**Evaluador**

Ing. Agr. M. Sc. Erika  
Mroginski  
**Director**

Ing. Agr. Luciana A.  
Galizia  
**Co-Director**

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

Pergamino,.....

## INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	4
1- INTRODUCCIÓN.....	5
1.1- Generalidades .....	5
1.2- Captura y uso de radiación.....	6
1.3- Captura y uso de agua. Arquitectura del sistema radical .....	7
1.4- Progreso genético.....	11
2- MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
2.1- Material vegetal.....	14
2.2- Conducción del experimento .....	14
2.3- Mediciones durante el ciclo del cultivo .....	15
2.4- Cálculos .....	16
2.5- Análisis estadístico.....	19
3- RESULTADOS .....	20
3.1- Condiciones climáticas .....	20
3.2- Rendimiento y sus componentes .....	21
3.3- Captura de luz .....	25
3.4- Captura y eficiencia de uso del agua.....	28
3.5- Análisis de componentes principales.....	31
4- DISCUSIÓN.....	33
5- CONCLUSIÓN .....	36
6- BIBLIOGRAFÍA .....	37
7- ANEXO.....	41
8- ABREVIATURAS .....	60

## **RESUMEN**

La productividad del cultivo de maíz está limitada principalmente por el agua y los nutrientes disponibles. En ausencia de estas limitantes, el rendimiento está directamente relacionado con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa incidente que pueda interceptar. Desde el punto de vista del mejoramiento genético, una característica fundamental de los sistemas agrícolas futuros será contar con nuevos cultivares con mejor conversión de los recursos en rendimiento, ya sea por una mejora en la captura o por una mejora en la utilización fisiológica de los recursos adquiridos. En este trabajo se seleccionaron cinco líneas, LP29, LP2542, LP923, LP4703 y LP122-2, por su comportamiento contrastante frente a déficit hídrico, para evaluar si presentan variabilidad para los atributos relacionados con la captura de recursos (*i.e.*, radiación y agua) y si el comportamiento diferencial en situaciones en que los recursos son limitantes (*i.e.*, secano y alta densidad) está asociado a la exploración del perfil lograda por las raíces y, por ende, a una mayor capacidad de extracción de agua del suelo. El ensayo se llevó a cabo en la localidad de Pergamino, en la campaña 2015/2016. Las líneas que mejor se comportaron fueron LP2542, que obtuvo los mayores valores de rendimiento en condiciones de riego, y LP923, que mostró la mayor estabilidad. LP29 mostró ser la línea más sensible para la mayoría de los atributos analizados. Los resultados obtenidos muestran que existe variabilidad genotípica para los caracteres estudiados y que varios de ellos están asociados a la determinación del rendimiento.

## **TÍTULO: Captura de recursos y funcionalidad del sistema radical de maíz.**

**PALABRAS CLAVE:** *Zea mays*, perfil de extracción de agua; radiación interceptada; déficit hídrico; tolerancia a estrés.

### **1- INTRODUCCIÓN**

#### **1.1- Generalidades**

El maíz (*Zea mays* L.) es una especie que corresponde a la familia de las gramíneas (*Poáceas*). Presente en América desde hace casi 5000 años (Wilkes, 1979), constituyó la base de la alimentación de muchas culturas americanas antiguas, Aztecas, Incas y Mayas. En la actualidad, de acuerdo a los datos más recientes disponibles, es el cereal con mayor volumen de producción a nivel mundial, superando en 2017 al trigo y al arroz (FAOSTAT, 2019). Argentina es el quinto productor mundial, siendo su participación del 42% en la producción agrícola nacional respecto a los cuatro principales cultivos exportables (soja, maíz, trigo y girasol) en la campaña 2017/18 (MAGYP, 2019).

El agua y la disponibilidad de nutrientes son las principales limitantes para la productividad en la agricultura. La oferta de agua interanual es muy variable, siendo una de las principales fuentes de variación en las precipitaciones el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO), que es ocasionado por cambios de la temperatura de la superficie del mar en el este del océano Pacífico ecuatorial.

Este fenómeno tiene impacto en el clima de la mayor parte del planeta. En la región Pampeana, cuando la temperatura del océano Pacífico ecuatorial aumenta, las precipitaciones tienden a ser superiores a las normales de noviembre a enero, determinando un año Niño. En cambio, cuando la

temperatura del océano disminuye, las precipitaciones tienden a ser inferiores al promedio entre octubre y diciembre, llamándose año Niña (Magrín *et al.*, 1998).

En un estudio que consideró un período de 95 años, los resultados muestran que han ocurrido 21 fases Niño y 23 fases Niña, lo cual representa 22 y 24% respectivamente, los años restantes se consideran Neutros (Dardanelli *et al.*, 2003). Dada la alta frecuencia de ocurrencia de años Niña en la región maicera argentina, es importante profundizar el conocimiento actual sobre el comportamiento de los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico, en búsqueda de mejorar su capacidad de tolerancia.

## 1.2- Captura y uso de radiación

En ausencia de limitantes hídricas y nutricionales, el crecimiento del cultivo está directamente relacionado con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (rango comprendido entre 400 a 700 nanómetros) incidente interceptada ( $RFA_{int}$ ) (Cirilo *et al.*, 2012). La producción de biomasa del cultivo es el resultado de la eficiencia con que la radiación incidente ( $RFA_i$ ) es interceptada por el canopy ( $e_i$ ) y de la eficiencia con que dicha radiación es convertida en materia seca (EUR). El rendimiento en grano está determinado directamente por la biomasa producida y el índice de cosecha (IC) (*i.e.*, relación entre el rendimiento en grano y la biomasa aérea).

$$\text{Biomasa} = RFA_i \times e_i \times \text{EUR}$$

$$\text{Rendimiento} = \text{Biomasa} \times \text{IC}$$

La cantidad de radiación solar interceptada acumulada ( $RFA_{ia}$ ) por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la dinámica de intercepción de dicho cultivo,

que está fuertemente ligada a la evolución del índice de área foliar (IAF). El IAF se genera a partir del número de hojas y del tamaño de las mismas, y su duración estará determinada por la tasa de senescencia (Cárcova *et al.*, 2003).

A su vez, el rendimiento por unidad de área del cultivo de maíz presenta una marcada respuesta parabólica al aumento de la densidad. Al ir aumentando la densidad, el rendimiento es superior debido a un mejor aprovechamiento de los recursos y a una mayor intercepción de la radiación por unidad de superficie, hasta un punto óptimo, después del cual el rendimiento comienza a decaer por la competencia entre plantas (Kruk y Satorre, 2003).

La densidad de plantas puede afectar principalmente la  $RFA_{int}$  a través de la posibilidad de lograr una rápida cobertura del suelo y mayores valores totales de radiación interceptada durante el ciclo del cultivo (Kruk y Satorre, 2003). Este efecto es altamente relevante debido a que el maíz, a diferencia de otros cultivos, posee escasa plasticidad fenotípica en el área foliar por planta frente a variaciones en la densidad. Esto se debe principalmente a que la mayoría de los genotipos tienen reducida capacidad de macollaje y a que el tamaño foliar es relativamente estable (Tetio-Kagho y Gardner, 1988). Por consiguiente, en bajas densidades de siembra, el cultivo no alcanza a desarrollar área foliar suficiente para alcanzar el índice de área foliar crítico, que es el IAF en el que el cultivo alcanza el 95% de intercepción de la radiación incidente (Andrade *et al.*, 1996).

### **1.3- Captura y uso de agua. Arquitectura del sistema radical**

Las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento de los cultivos de secano (Boyer, 1982). El consumo de agua de los cultivos, cuando el contenido de agua disponible en el suelo se encuentra por encima de un umbral crítico, está determinado por una tasa de

transpiración cercana a la que establece la demanda atmosférica. Cuando el contenido de agua disponible está por debajo de dicho umbral, la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber el agua del suelo, que depende de la densidad y profundidad de las raíces, la conductancia hidráulica de los tejidos vasculares y la capacidad de ajuste osmótico (Nilsen y Orcutt, 1996).

La transpiración implica un flujo de agua desde la fuente, representada por el agua potencialmente extraíble almacenada en el suelo, hasta el destino, representado por la atmósfera. El movimiento entre ambos compartimentos es directamente proporcional a la diferencia de potencial hídrico ( $\psi_w$ ) entre la matriz del suelo (potencial más alto) y la atmósfera (potencial más bajo), e inversamente proporcional a las resistencias al flujo de agua ( $r$ ) ofrecidas por los distintos componentes del sistema suelo-planta-atmósfera. El flujo transpiratorio está directamente relacionado con la fijación de  $\text{CO}_2$  ya que: (i) la radiación solar es la fuente de energía para ambos procesos y (ii) los flujos de ambos gases tienen resistencias en común, *i.e.* estomas y capa límite. Por consiguiente, bajo condiciones favorables para la absorción de agua, cuanto más energía absorbe un canopeo, más agua puede transpirar y más  $\text{CO}_2$  puede fijar (Dardanelli *et al.*, 2003).

El rendimiento en grano está estrechamente asociado con la transpiración y fijación del  $\text{CO}_2$ . Es importante que el cultivo pueda (i) capturar la mayor parte posible del recurso agua, donde toma gran importancia la capacidad de las raíces de explorar el perfil de suelo, (ii) utilizar el recurso capturado lo más eficientemente posible al intercambiarlo a nivel de estomas por el  $\text{CO}_2$  destinado a producir fotoasimilados y (iii) convertir la mayor parte posible de los asimilados

a órganos de cosecha (*i.e.*, granos) (Passioura, 1996). Por lo tanto, el rendimiento en grano está afectado directamente por la cantidad de agua transpirada (T), la eficiencia en su uso (EUA) (*i.e.*, la biomasa aérea producida por unidad de agua transpirada) y el índice de cosecha (IC).

$$\text{Rendimiento} = T \times \text{EUA} \times \text{IC}$$

Dado que los recursos se distribuyen de manera heterogénea en el suelo, la distribución espacial del sistema radical determinará la capacidad del cultivo de capturar los recursos edáficos (De Dorlodot *et al.*, 2007). Es decir, que una planta con un sistema radical capaz de explorar un mayor volumen de suelo tendrá la capacidad de extraer una mayor cantidad de agua y nutrientes. Un sistema radical denso y profundo le permite a un cultivo acceder a un mayor volumen de agua del suelo, con el cual sostener la demanda transpiratoria y un adecuado estado hídrico por más tiempo. Sin embargo, la utilidad de estos rasgos para sobrellevar períodos de sequía (*i.e.*, con escasas precipitaciones) merece dos comentarios: (i) el desarrollo de un sistema radical profuso requiere cantidades importantes de asimilados para su crecimiento y mantenimiento, compitiendo en muchos casos por los mismos con otros destinos de mayor importancia productiva directa (*i.e.*, granos), y (ii) mantener el consumo de agua de acuerdo a la demanda constituye una buena estrategia en ambientes con sequías transitorias, donde el reabastecimiento del perfil por lluvias ocurre antes de que el cultivo haya consumido toda el agua potencialmente extraíble en el perfil enraizado, que es lo que normalmente ocurre en la región maicera argentina.

El valor de estrategias basadas en sistemas radicales profundos es dependiente de la probabilidad de encontrar agua accesible en el suelo, la que a su vez depende de características del suelo y del patrón de lluvias. Carretero *et al.*, 2014, a través de modelos de simulación, modificaron el sistema radical de un híbrido de maíz para evaluar el posible beneficio que tendría un sistema radical con mayor densidad de raíces profundas. Estos autores encontraron que una mayor profundidad radical aumenta la absorción total de agua (*i.e.*, evapotranspiración acumulada), produciendo aumentos significativos en el rendimiento. La magnitud de este incremento dependió del tipo de suelo y de la disponibilidad hídrica total del perfil, siendo en promedio del 4,7 y 11,7% para las localidades de Pilar (Haplustol éntico) y Pergamino (Argiudol típico), respectivamente.

La profundidad alcanzada por las raíces de un cultivo puede ser evaluada en forma directa mediante el seguimiento a campo de la profundidad a la que se encuentra el ápice radical. Este procedimiento es sumamente dificultoso, por lo cual se han desarrollado métodos indirectos para su estimación basados en mediciones de humedad de suelo. La profundidad de raíces, medida en forma directa en girasol, soja, maíz y trigo, creciendo en suelos sin limitaciones físicas, muestra un patrón sigmoideo que alcanza la máxima profundidad cuando comienza el llenado de los granos (Figura 1) (Andriani, 2000).

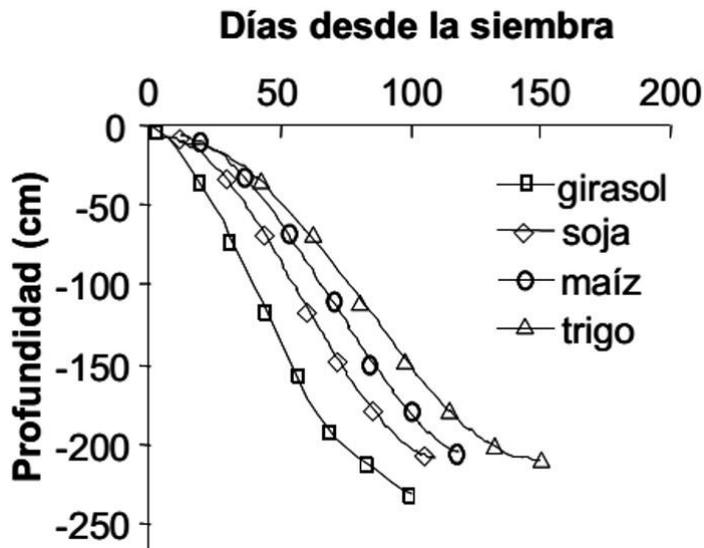


Figura 1: Evolución de la profundización de las raíces desde la siembra para los cultivos de girasol, soja, maíz y trigo (Andriani, 2000).

Desde la siembra, la velocidad de profundización de las raíces es afectada por la densidad de siembra. En el cultivo de girasol, cuando la densidad de plantas fue mayor, la exploración de capas profundas de suelo se anticipó, y cuando la densidad de plantas fue menor la profundización continuó en etapas más avanzadas del ciclo del cultivo (Sadras *et al.*, 1989). En soja el ángulo de crecimiento de las raíces se hace más vertical cuando las raíces de una planta se acercan a la rizósfera de una planta vecina (Raper y Barber, 1970).

#### 1.4- Progreso genético

Desde el punto de vista del mejoramiento genético, y habiendo maximizado la explotación de la heterosis como vía de incremento del rendimiento a partir del uso masivo de híbridos simples (Duvick, 2005), los estudios ecofisiológicos realizados sobre maíces en las últimas décadas indican que el mejor desempeño productivo de los mismos se debe a una mayor captura y uso eficiente de los recursos ambientales (Tollenaar y Wu, 1999). Una característica fundamental de

los sistemas agrícolas futuros será contar con nuevos cultivares con mejor conversión de los recursos en rendimiento. Existen dos vías alternativas para mejorar la eficiencia de los cultivos: (i) mejorar la captura y (ii) mejorar la utilización fisiológica de los recursos adquiridos. Si bien ambas alternativas merecen ser exploradas, la mejora en la captura representa la mayor oportunidad para el mejoramiento de los cultivos (Passioura, 2002).

El cultivo de maíz es uno de los cultivos que mayor progreso genético ha tenido, pero tanto el mejoramiento del cultivo como la investigación ecofisiológica se han centrado en la productividad y funcionalidad del sistema aéreo, siendo comparativamente despreciable el conocimiento equivalente referido al sistema radical. En consecuencia, se desconoce (i) la magnitud de la variabilidad genotípica disponible para rasgos asociados a la captura de agua del suelo y (ii) su impacto en la productividad del cultivo.

Previamente, el grupo maíz de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Pergamino, en un trabajo conjunto con investigadores del INTA-EEA San Juan, evaluaron el comportamiento de líneas e híbridos pertenecientes al Programa de Mejoramiento del INTA-EEA Pergamino ante estrés hídrico en experimentos a campo en la provincia de San Juan, e identificaron materiales con diferentes niveles de tolerancia. A partir de dicho trabajo, se seleccionaron las líneas LP29, LP2542, LP923, LP4703 y LP122-2, por su comportamiento contrastante (Ruiz y Eyhérbide, 2015). En otro trabajo realizado junto a investigadores del INTA-EEA Paraná, en ensayos llevados a cabo en macetas, se hallaron diferencias en la respuesta de la fotosíntesis al estrés hídrico entre varias de las líneas mencionadas (Muller *et al.*, 2010). Asimismo, trabajos previos muestran que

existe variabilidad en la capacidad de capturar agua y radiación en otro grupo de líneas pertenecientes al programa de mejoramiento de maíz del INTA-EEA Pergamino (Galizia *et al.*, 2014; Galizia *et al.*, 2015).

### **Hipótesis**

- Existe variabilidad para los atributos relacionados con la captura de recursos (*i.e.*, radiación y agua) en el conjunto de líneas bajo estudio.
- El rendimiento superior en situaciones en que los recursos son limitantes (*i.e.*, secano y alta densidad) está asociado a la exploración del perfil lograda por las raíces y, por ende, a una mayor capacidad de extracción de agua del suelo.

### **Objetivo general**

Analizar la variación genotípica, expresada en el fenotipo, en la captura de recursos (*i.e.*, radiación y agua) a través del ciclo del cultivo y su impacto sobre la producción de maíz, en condiciones ambientales contrastantes de disponibilidad hídrica y densidad poblacional.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar la variabilidad genotípica, a partir de su expresión fenotípica, para los caracteres relacionados con la captura de recursos en 5 líneas endocriadas bajo dos regímenes hídricos y dos densidades de siembra.
- Determinar la relación entre rasgos y el comportamiento diferencial de las líneas frente a condiciones de estrés hídrico y/o por alta densidad poblacional.

## **2- MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1- Material vegetal**

El material genético evaluado constó de un conjunto de cinco líneas endocriadas (LP29, LP923, LP2542, LP4703 y LP122-2) seleccionadas por su comportamiento contrastante frente a eventos de estrés hídrico (Ruiz y Eyhérbide, 2015), pertenecientes al Programa de Mejoramiento de Maíz del INTA-EEA Pergamino (Tabla 1).

Tabla 1: Características generales de cinco líneas de maíz con comportamiento variable frente a condiciones de estrés hídrico.

<b>Línea</b>	<b>Origen</b>	<b>Año de liberación</b>	<b>Textura</b>	<b>Color grano</b>	<b>Comportamiento a estrés hídrico*</b>
<b>LP122-2</b>	(L3178xL196)F <sub>2</sub>	2011	Flint	Colorado	Intermedia
<b>LP29</b>	Compuesto colorado precoz	2004	Semiflint	Anaranjado	Susceptible
<b>LP2542</b>	Compuesto BS13	2005	Dentado	Amarillo	Altamente tolerante
<b>LP4703</b>	Compuesto prolífico	2006	Flint	Colorado	Tolerante
<b>LP923</b>	Cruzamientos planeados	2011	Flint	Anaranjado	Medianamente tolerante

\*Comportamiento determinado como porcentaje de disminución del rendimiento en sequía respecto del control, en estudios previos (Ruiz y Eyhérbide, 2015).

### **2.2- Conducción del experimento**

El experimento se realizó en la EEA Pergamino del INTA (33° 56' S, 60° 33' W), sobre un suelo arcillo-limoso (Argiudol típico) perteneciente a la serie Pergamino.

La siembra se realizó manualmente el 16 de noviembre de 2015. Cada parcela tuvo tres surcos de 6 m de largo distantes a 0,7 m entre sí. El germoplasma se distribuyó en un diseño en parcelas divididas con tres repeticiones, dónde la parcela principal o mayor estuvo dada por el nivel de disponibilidad hídrica (riego y secano), dentro de la cual se asignaron al azar a cada sub-parcela (o parcela

menor) todas las combinaciones posibles entre los niveles de densidad de siembra y genotipo. Se utilizaron dos densidades de siembra: 7 plantas  $m^{-2}$  y 12 plantas  $m^{-2}$ . En el tratamiento bajo riego se aplicó riego por aspersión con el objetivo de mantener el estrato superior del suelo en capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo.

Durante el experimento se registraron diariamente a lo largo del ciclo del cultivo: las temperaturas media, mínima y máxima del aire, la radiación solar global incidente ( $RFA_{inc}$ ) y las precipitaciones, con una estación meteorológica ubicada a 1500 m del ensayo.

Dentro de cada parcela se identificaron 7 o 12 plantas en el estado de tres hojas liguladas ( $V_3$ : Ritchie y Hanway, 1982) de acuerdo a la densidad de siembra (equivalente a 1  $m^2$ ), sobre las que se realizaron todas las mediciones no destructivas hasta madurez fisiológica, momento en el cual se cosecharon todas las plantas marcadas.

### **2.3- Mediciones durante el ciclo del cultivo**

Las mediciones que se hicieron a lo largo del ciclo del cultivo fueron:

- a) Humedad del suelo a la siembra: utilizando barreno y el método de humedad gravimétrica hasta 1,8 m de profundidad.
- b) Radiación interceptada por el canopeo: para determinar la eficiencia de intercepción de luz y la cantidad de radiación capturada por el cultivo (en MJ  $m^{-2}$ ) a lo largo del ciclo, se realizaron mediciones por encima y por debajo del canopeo cada 15 días utilizando un sensor lineal o ceptómetro.
- c) Dinámica de floración: en las plantas identificadas se registraron diariamente, las fechas de antesis y emisión de estigmas (*silking*) de la espiga apical.

- d) Humedad del suelo en madurez fisiológica (MF): en el estrato superficial (0-30 cm) se determinó utilizando barreno y el método de humedad gravimétrica. A partir de los 30 cm, hasta los 180 cm de profundidad, para cada estrato de 30 cm se determinó el contenido de agua mediante una sonda de neutrones.
- e) Rendimiento y sus componentes: a madurez fisiológica, se cosecharon las plantas identificadas y en ellas se determinaron el rendimiento en grano por planta (**RGP**, en g), el número de granos por planta (**NGP**, en granos) y el peso individual de los granos (**PG**, en mg).

## 2.4- Cálculos

**ASI**, Intervalo antesis-*silking* (en días): El intervalo antesis-*silking* se obtuvo para cada planta marcada como la diferencia en días entre la fecha de *silking* y de antesis, luego se promediaron los valores para cada parcela.

$$\text{ASI (días)} = \text{Fecha de } \textit{silking} - \text{Fecha de antesis}$$

**Rto ha<sup>-1</sup>**, Rendimiento por hectárea (en kg ha<sup>-1</sup>): Se obtuvo multiplicando el RGP por la densidad.

$$\text{Rto ha}^{-1} = \text{RGP (kg pl}^{-1}) \times \text{Densidad de siembra (pl ha}^{-1})$$

**PG**, Peso individual de los granos (en mg): El peso de los granos se obtuvo para cada parcela como la relación entre el rendimiento en grano por planta y el número de granos por planta.

$$\text{PG (mg)} = \text{RGP (mg pl}^{-1}) / \text{NGP}$$

**ei**, Eficiencia de intercepción: La eficiencia de intercepción se obtuvo para cada parcela cada 15 días, como el cociente entre el valor de radiación medida con un ceptómetro debajo del canopeo y sobre él.

**Evolución de la ei**: A partir de los valores de ei obtenidos a lo largo del ciclo, se

ajustó un modelo no lineal ( $y = a * \exp^{-0.5 * [\log(x/b)/c]^2}$ ) a la evolución de la  $e_i$  en función de los días desde la siembra. Para ello se empleó el programa GraphPad Prism version 7.0 (GraphPad Software, San Diego, California USA, [www.graphpad.com](http://www.graphpad.com)).

**RFA<sub>i</sub>**, Radiación fotosintéticamente activa interceptada diaria (en  $\text{MJ m}^{-2}$ ): La radiación interceptada para cada día se obtuvo a partir de los datos meteorológicos de radiación incidente diarios ( $\text{RFA}_{\text{incidente}}$ ) y de la eficiencia de intercepción estimada para cada día a partir de los modelos ajustados a la evolución de la  $e_i$ .

$$\text{RFA}_i (\text{MJ m}^{-2}) = \text{RFA}_{\text{incidente}} (\text{MJ m}^{-2}) \times e_i$$

**fRFA<sub>im</sub>**, Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima: es el valor máximo de  $e_i$  durante el ciclo del cultivo.

**RFA<sub>ia</sub>**, Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (en  $\text{MJ m}^{-2}$ ): La radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada se obtuvo para cada parcela como la sumatoria de la radiación interceptada diaria desde la fecha de emergencia del cultivo hasta la madurez fisiológica.

$$\text{RFA}_{ia} (\text{MJ m}^{-2}) = \sum \text{RFA}_i (\text{emergencia} - \text{madurez fisiológica})$$

**Lámina de agua final** (en mm): la lámina final se obtuvo para cada parcela en madurez fisiológica.

En el estrato superficial (0-30 cm) se determinó utilizando barreno y el método de humedad gravimétrica.

$$\text{Humedad gravimétrica (\%)} = \frac{(\text{Peso suelo húmedo (g)} - \text{Peso suelo seco (g)})}{\text{Peso suelo seco (g)}} \times 100$$

donde peso suelo húmedo representa el valor obtenido inmediatamente después de la extracción de la muestra y peso suelo seco el correspondiente a la misma muestra luego de tres días de secado en estufa a  $110^\circ\text{C}$ .

A partir de los 30 cm, hasta los 180 cm de profundidad, para cada estrato de 30 cm se determinó la **lámina de agua** (mm) mediante una sonda de neutrones; las lecturas de la sonda fueron transformadas a valores de humedad gravimétrica usando una calibración previamente realizada para el tipo de suelo donde se realizó el ensayo.

Luego, a partir de los valores de humedad gravimétrica (HumG), de densidad aparente ( $d_a$ ) correspondientes a cada estrato de suelo y asumiendo que la densidad del agua es de  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , se obtuvo la humedad volumétrica (HumV).

$$\text{HumV (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{HumG} \times [\text{da suelo (g cm}^{-3}\text{)} / \text{densidad del agua (g cm}^{-3}\text{)}]$$

Por último, con los valores de humedad volumétrica se calculó la lámina final multiplicando este valor por la profundidad de suelo, que en nuestro caso fueron 300 mm.

$$\text{Lámina final (mm)} = \text{HumV (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} \times 300 \text{ mm}$$

**ET**, Evapotranspiración del cultivo entre emergencia y madurez fisiológica (en mm): La evapotranspiración se obtuvo para cada parcela como la sumatoria entre la cantidad de agua inicial del suelo (lámina inicial), la aportada por lluvias y por riegos, menos la cantidad de agua en el suelo al final del ciclo del cultivo (lámina final).

$$\text{ET (mm)} = \text{Lámina inicial (mm)} + \text{Lluvias (mm)} + \text{Riegos (mm)} - \text{Lámina final (mm)}$$

**EUA**, Eficiencia de uso del agua (en  $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ): La eficiencia de uso del agua para producir granos en función del agua evapotranspirada durante el ciclo del cultivo se obtuvo para cada parcela como la relación entre el rendimiento en kg por hectárea y la cantidad de agua evapotranspirada en mm a lo largo del ciclo del cultivo.

$$\text{EUA (kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}) = \text{Rto ha}^{-1} \text{ (kg ha}^{-1}) / \text{ET (mm)}$$

## 2.5- Análisis estadístico

Los resultados se analizaron estadísticamente utilizando el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013). Los datos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA) y análisis multivariado.

Para el ANOVA se ajustó el siguiente modelo de efectos fijos:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_k + (\tau\beta)_{ik} + \alpha_j + \delta_l + (\alpha\delta)_{jl} + (\tau\alpha)_{ij} + (\tau\delta)_{il} + (\tau\alpha\delta)_{ijl} + \varepsilon_{ijkl}$$

donde  $Y_{ijkl}$  es el valor del carácter para el  $j$ -ésimo genotipo, en el  $i$ -ésimo nivel de condición hídrica,  $k$ -ésimo bloque y  $l$ -ésimo nivel de densidad;  $\mu$  es la media general;  $\tau_i$  es el efecto de la  $i$ -ésima condición hídrica, siendo  $i = 1, 2$ ;  $\beta_k$  es el efecto del  $k$ -ésimo bloque, siendo  $k = 1, 2, 3$ ;  $(\tau\beta)_{ik}$  es el error de la parcela mayor (Error A);  $\alpha_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo genotipo, siendo  $j = 1, \dots, 5$ ;  $\delta_l$  es el efecto de la  $l$ -ésima densidad, siendo  $l = 1, 2$ ;  $(\alpha\delta)_{jl}$  es el efecto de la interacción de los tratamientos genotipo y densidad;  $(\tau\alpha)_{ij}$  es el efecto de la interacción de los tratamientos condición hídrica y genotipo;  $(\tau\delta)_{il}$  es el efecto de la interacción de los tratamientos condición hídrica y densidad;  $(\tau\alpha\delta)_{ijl}$  es el efecto de la interacción de los tratamientos condición hídrica, genotipo y densidad y  $\varepsilon_{ijkl}$  es el error de la parcela menor (Error B).

Para analizar posibles asociaciones entre los caracteres y las líneas bajo estudio, se realizó un Análisis de Componentes Principales a partir de la matriz de valores medios de las variables evaluadas para cada genotipo en cada ambiente. Se retuvieron las dos primeras componentes principales (CP) y se las representó en un biplot, que facilitó la visualización de las relaciones entre los genotipos y las variables.

### **3- RESULTADOS**

#### **3.1- Condiciones climáticas**

A lo largo del ciclo del cultivo (16 de noviembre de 2015 al 30 de abril de 2016) la temperatura media del aire fue de 21°C, con promedios de temperaturas mínimas de 14,1°C y máximas de 27,8°C. Durante el período crítico para la determinación del rendimiento (1 de febrero  $\pm$  15 días) la temperatura media del aire fue de 23,6°C, con promedios de temperaturas máximas de 31,3°C y mínimas de 16°C. La radiación fotosintéticamente activa incidente registrada a lo largo del ensayo fue en promedio de 6,80MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, mientras que dentro del período crítico su valor fue de 8,98MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Las precipitaciones registradas fueron en total 712,5 mm, mientras que en el período crítico sumaron solo 36 mm. En cuanto al riego, se aplicaron un total de 76,2 mm, de los cuales 68,2 mm fueron durante el período crítico (Figura 2).

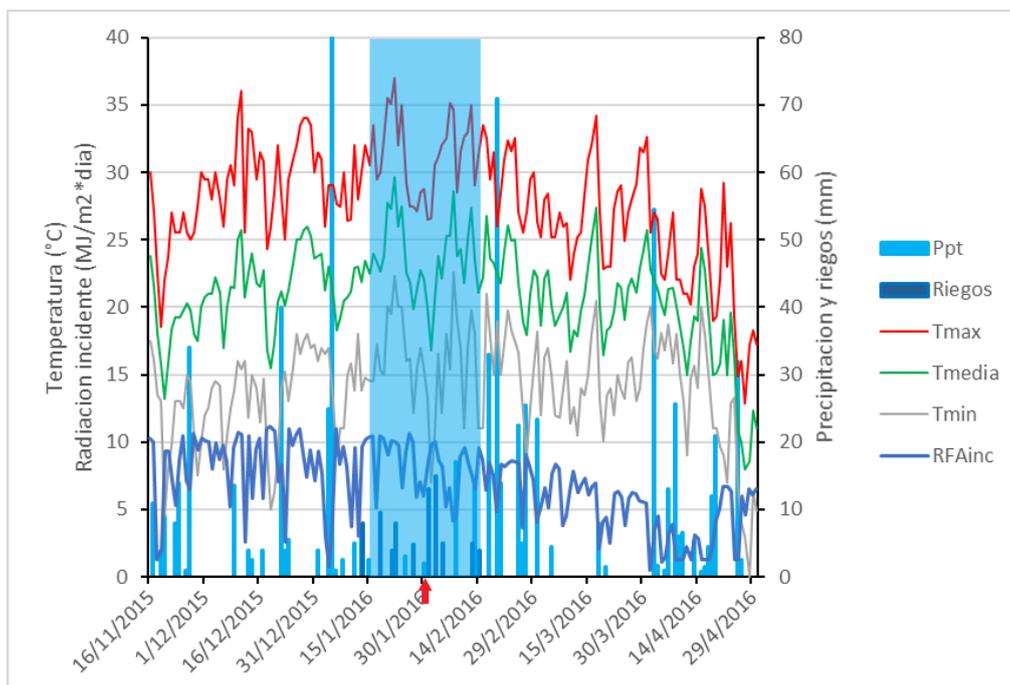


Figura 2: Evolución de los valores medios diarios de: Precipitaciones (Ppt) en mm; Temperaturas máxima (Tmáx.), media (Tmedia) y mínima (Tmín) en °C; Radiación incidente (RFAinc) en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>; desde la siembra (16/11/2015) hasta la fecha en que todos los genotipos alcanzaron madurez fisiológica (30/04/2016). La flecha marca el centro del período crítico y el rectángulo celeste la duración del mismo (01 febrero ± 15 días). Se indica los riegos realizados durante el cultivo en el tratamiento bajo riego.

### 3.2- Rendimiento y sus componentes

El análisis de varianza para el rendimiento en grano (por planta y por unidad de superficie) y sus componentes numéricas muestra que existen interacciones significativas (Tabla 2). Una de ellas es la interacción genotipo × condición hídrica, donde se destaca LP2542 bajo riego, diferenciándose significativamente del resto de las combinaciones para Rto/ha y RGP. En secano, se destacó LP923, obteniendo los mejores valores promedio de Rto/ha y RGP, con diferencias significativas respecto a los demás genotipos excepto con LP2542, y destacando también que dichos rendimientos no difirieron significativamente bajo riego. Para NGP, también se destacó LP2542 bajo riego diferenciándose del

resto de los genotipos, y bajo secano LP923 obtuvo el mayor valor promedio, diferenciándose significativamente solo de LP29, y a su vez con ausencia de diferencias significativas ante el cambio de riego a secano (Anexo 1.b, 2.c, 3.b). Por otro lado, la interacción genotipo x densidad no fue significativa, pero sí fue significativa la interacción densidad x condición hídrica (Tabla 2). Así, riego x alta densidad y riego x baja densidad obtuvieron el primer y segundo lugar en rendimiento por hectárea respectivamente, diferenciándose significativamente entre sí y de ambos niveles de densidad en secano (Anexo 1.c). Cambios en la densidad mostraron diferencias significativas para el rendimiento por planta (Anexo 2.b) y el número de granos por planta (Anexo 3.c) (Tabla 3).

El genotipo que presentó el mayor rendimiento promedio fue LP2542, en la condición de alta densidad x riego. También obtuvo el mayor rendimiento en grano por planta y número de granos por planta en la combinación de baja densidad x riego. En esta misma condición de siembra LP923 presentó el menor intervalo anthesis-*silking*, y en la combinación baja densidad x secano LP29 registró el mayor peso individual de los granos (Tabla 3). Por otro lado, LP29 fue el genotipo más sensible a cambios en la condición hídrica para el número de granos por planta, rendimiento por planta y por hectárea, seguido por LP2542, que aunque presentó buenos rendimientos bajo ambas condiciones mostró una sensibilidad elevada al cambio en la condición hídrica. Lo contrario ocurrió con LP122-2, que si bien mostró baja sensibilidad al cambio en la condición hídrica, presentó valores de rendimiento bajos tanto en secano como en riego. LP4703 fue el genotipo más sensible para peso de los granos, mientras que LP923 fue el más estable para todas estas variables (Tabla 4).

Tabla 2: Análisis de Varianza de las variables analizadas.

Fuentes de variación	Nivel de significancia de efectos principales e interacciones								
	Rto/ha	RGP	NGP	PG	ASI	fRFAim	RFAia	ET	EUA
Bloque (B)	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Condición Hídrica (H)	***	***	**	ns	**	**	*	*	*
Genotipo (G)	***	***	***	***	***	*	***	ns	***
Densidad (D)	ns	***	***	***	***	***	***	ns	ns
G x H	**	**	**	ns	*	*	ns	ns	***
G x D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
H x D	*	ns	ns	**	**	ns	**	*	ns
G x H x D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns, \*, \*\*, \*\*\* representan  $P > 0,05$ ,  $P < 0,05$ ,  $P < 0,01$ ,  $P < 0,001$ , respectivamente para los factores principales e interacciones.

Referencias: ASI: intervalo anthesis-silking (días), ET: evapotranspiración del cultivo entre emergencia y madurez fisiológica (mm), EUA: eficiencia de uso del agua ( $\text{kg grano ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ), fRFAim: fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima, NGP (granos): número de granos por planta, PG: peso individual de los granos (mg), RFAia: radiación fotosintéticamente activa interceptada entre emergencia y madurez fisiológica ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), RGP: rendimiento en grano por planta (g), Rto  $\text{ha}^{-1}$ : rendimiento por hectárea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Tabla 3: Valores medios de caracteres ecofisiológicos en líneas de maíz evaluadas en ambientes variables en su condición hídrica (R: Riego; S: Secano) y densidad de siembra (7 y 12  $\text{pl m}^{-2}$ ).

Cond Hídrica	Densidad (pl m <sup>-2</sup> )	Genotipo	RGP (g)	Rto ha <sup>-1</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	NGP	PG (mg)	ASI (días)	fRFAim	RFAia (MJ m <sup>-2</sup> )	ET (mm)	EUA (kg mm <sup>-1</sup> )
R	7	LP122-2	44,2	3094	263	175,0	5,0	0,80	447,0	449	6,9
R	7	LP2542	<b>117,4</b>	8214	<b>503</b>	230,1	3,2	0,77	447,7	440	18,7
R	7	LP29	78,5	5493	288	271,7	0,7	0,66	363,7	469	11,8
R	7	LP4703	72,3	5062	375	192,9	3,6	0,71	391,5	464	10,9
R	7	LP923	95,0	6648	404	235,1	<b>0,6</b>	0,64	379,0	441	15,1
Promedio Riego 7 pl m <sup>-2</sup>			81,5	5702,4	366,6	221,0	2,6	0,7	405,8	452,7	12,7
R	12	LP122-2	33,9	4064	224	150,8	5,5	0,83	530,4	467	8,7
R	12	LP2542	96,1	<b>11527</b>	413	233,9	3,6	0,85	<b>629,8</b>	438	<b>26,9</b>
R	12	LP29	57,8	6938	230	252,1	1,6	0,81	467,9	477	14,6
R	12	LP4703	46,4	5563	246	187,4	4,3	<b>0,87</b>	486,9	<b>480</b>	11,5
R	12	LP923	58,0	6954	251	231,6	1,0	0,79	458,6	464	15,0
Promedio Riego 12 pl m <sup>-2</sup>			58,4	7009,4	273,0	211,2	3,2	0,8	514,7	465,3	15,3
S	7	LP122-2	27,6	1932	160	170,1	6,0	0,63	393,4	387	5,0
S	7	LP2542	61,9	4335	279	224,5	4,4	0,65	379,7	424	10,2
S	7	LP29	36,1	2528	124	<b>286,4</b>	2,9	0,57	<b>346,2</b>	389	6,7
S	7	LP4703	50,4	3530	291	174,6	5,3	0,58	381,5	396	8,9
S	7	LP923	60,8	4253	268	227,3	1,4	0,59	352,9	382	11,1
Promedio Secano 7 pl m <sup>-2</sup>			47,4	3315,7	224,4	216,6	4,0	0,6	370,8	395,5	8,4
S	12	LP122-2	15,6	<b>1877</b>	128	125,9	8,0	0,64	423,4	396	<b>4,9</b>
S	12	LP2542	29,2	3506	168	174,1	<b>9,5</b>	0,74	455,5	348	10,0
S	12	LP29	<b>17,9</b>	2144	<b>92</b>	192,1	6,2	0,63	419,4	391	5,2
S	12	LP4703	20,4	2454	155	<b>118,4</b>	7,2	<b>0,56</b>	357,2	<b>341</b>	6,9
S	12	LP923	48,7	5846	205	237,6	1,8	0,74	411,1	382	15,3
Promedio Secano 12 pl m <sup>-2</sup>			26,4	3165,3	149,5	169,6	6,5	0,7	413,3	371,7	8,4
Promedio Riego			69,9	6355,9	319,8	216,1	2,9	0,8	460,3	459,0	14,0
Promedio Secano			36,9	3240,5	187,0	193,1	5,3	0,6	392,0	383,6	8,4
Promedio 7 pl m <sup>-2</sup>			64,4	4509,0	295,5	218,8	3,3	0,7	388,3	424,1	10,5
Promedio 12 pl m <sup>-2</sup>			42,4	5087,4	211,2	190,4	4,9	0,7	464,0	418,5	11,9

Referencias: ASI: intervalo antesis-silking (días), ET: evapotranspiración del cultivo entre emergencia y madurez fisiológica (mm), EUA: eficiencia de uso del agua (kg grano ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), fRFAim: fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima, NGP: número de granos por planta, PG: peso individual de los granos (mg), RFAia: radiación fotosintéticamente activa interceptada entre emergencia y madurez fisiológica (MJ m<sup>-2</sup>), RGP: rendimiento en grano por planta (g), Rto ha<sup>-1</sup>: rendimiento por hectárea (kg ha<sup>-1</sup>). En azul y rojo se muestran los valores máximos y mínimos para cada carácter respectivamente.

Tabla 4: Sensibilidad de las líneas endocriadas ante las variaciones de la condición hídrica, promedio de ambas densidades de siembra. R: Media genotípica bajo riego; S: Media genotípica en seco; R-S: Diferencia al pasar de la condición más favorable a la menos favorable para el crecimiento (Riego menos Secano); %: Reducción expresada como porcentaje. Las flechas indican el genotipo más sensible en rojo y en azul al menos sensible ante la variación de la condición hídrica.

Genotipo		RGP (g)	Rto ha <sup>-1</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	NGP	PG (mg)	ASI (días)	fRFAim	RFAia (MJ m <sup>-2</sup> )	ET (mm)	EUA (kg mm <sup>-1</sup> )
LP122-2	R	39,04	3579,26	243,88	162,90	5,24	0,81	488,68	458,20	7,78
	S	21,62	1904,66	144,06	147,97	7,00	0,63	408,36	391,53	4,97
	R-S	17,42	1674,60	99,82	14,93	-1,76	0,18	80,32	66,67	2,82
	%	44,6%	46,8%	40,9%	9,2%	-33,6%	22,0%	16,4%	14,5%	36,2%
LP2542	R	106,71	9870,79	457,89	231,99	3,39	0,81	538,77	439,04	22,81
	S	45,58	3920,58	223,18	199,27	6,92	0,70	417,63	386,07	10,06
	R-S	61,13	5950,21	234,72	32,73	-3,54	0,11	121,14	52,97	12,75
	%	57,3%	60,3%	51,3%	14,1%	-104,4%	13,8%	22,5%	12,1%	55,9%
LP29	R	68,15	6215,92	259,32	261,91	1,15	0,73	415,80	473,25	13,17
	S	26,99	2336,06	107,99	239,25	4,54	0,60	382,82	390,36	5,93
	R-S	41,16	3879,86	151,33	22,65	-3,38	0,13	32,98	82,90	7,25
	%	60,4%	62,4%	58,4%	8,6%	-293,4%	18,0%	7,9%	17,5%	55,0%
LP4703	R	59,34	5312,33	310,57	190,16	3,94	0,79	439,24	472,34	11,20
	S	35,44	2991,80	223,19	146,49	6,26	0,57	369,38	368,10	7,89
	R-S	23,90	2320,53	87,38	43,67	-2,32	0,22	69,86	104,24	3,31
	%	40,3%	43,7%	28,1%	23,0%	-58,9%	27,5%	15,9%	22,1%	29,6%
LP923	R	76,46	6801,24	327,32	233,34	0,82	0,72	418,81	452,35	15,05
	S	54,74	5049,38	236,40	232,46	1,58	0,66	382,02	381,87	13,19
	R-S	21,73	1751,86	90,93	0,88	-0,76	0,05	36,79	70,48	1,87
	%	28,4%	25,8%	27,8%	0,4%	-91,7%	7,5%	8,8%	15,6%	12,4%

Referencias: ASI: intervalo anthesis-silking (días), ET: evapotranspiración del cultivo entre emergencia y madurez fisiológica (mm), EUA: eficiencia de uso del agua (kg grano ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), fRFAim: fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima, NGP: número de granos por planta, PG: peso individual de los granos (mg), RFAia: radiación fotosintéticamente activa interceptada entre emergencia y madurez fisiológica (MJ m<sup>-2</sup>), RGP: rendimiento en grano por planta (g), Rto ha<sup>-1</sup>: rendimiento por hectárea (kg ha<sup>-1</sup>).

### 3.3- Captura de luz

El genotipo LP4703 fue el que presentó la mayor y la menor fracción máxima de radiación interceptada (fRFAim), en riego x alta densidad y en seco x alta densidad, respectivamente (Tabla 3, Figura 3), mostrando una gran sensibilidad a cambios en la condición hídrica para este atributo (Tabla 4). Por otro lado,

LP2542 fue la línea con mayor radiación interceptada acumulada a lo largo del ciclo de cultivo, en la combinación riego x alta densidad, mientras que LP29 obtuvo el menor valor promedio de radiación acumulada en la condición de secoano x baja densidad (Tabla 3, Figura 4).

En el análisis de varianza para las variables relacionadas a captura de luz se encontraron diferencias significativas en  $fRFA_{im}$  para genotipo x condición hídrica y para densidad (Tabla 2). Así, LP122-2 y LP2542 bajo riego registraron el mayor valor promedio de  $fRFA_{im}$  (0,81), aunque no se diferenciaron significativamente del resto de los genotipos bajo riego, ni de LP2542 en secoano (Anexo 6.b). En cuanto a la densidad, las parcelas sembradas con alta densidad obtuvieron valores promedio superiores (0,74) (y con diferencia significativa respecto a las sembradas en baja densidad (0,66) (Anexo 6.c).

Para la radiación acumulada ( $RFA_{ia}$ ), se encontraron diferencias significativas para condición hídrica x densidad y para genotipos (Tabla 2). Riego x alta densidad obtuvo el mayor valor promedio, diferenciándose significativamente del resto de las combinaciones (Anexo 7.b), en cuanto a los genotipos, LP2542 registró el mayor valor para  $RFA_{ia}$  sin diferenciarse significativamente de LP122-2 (Anexo 7.c).

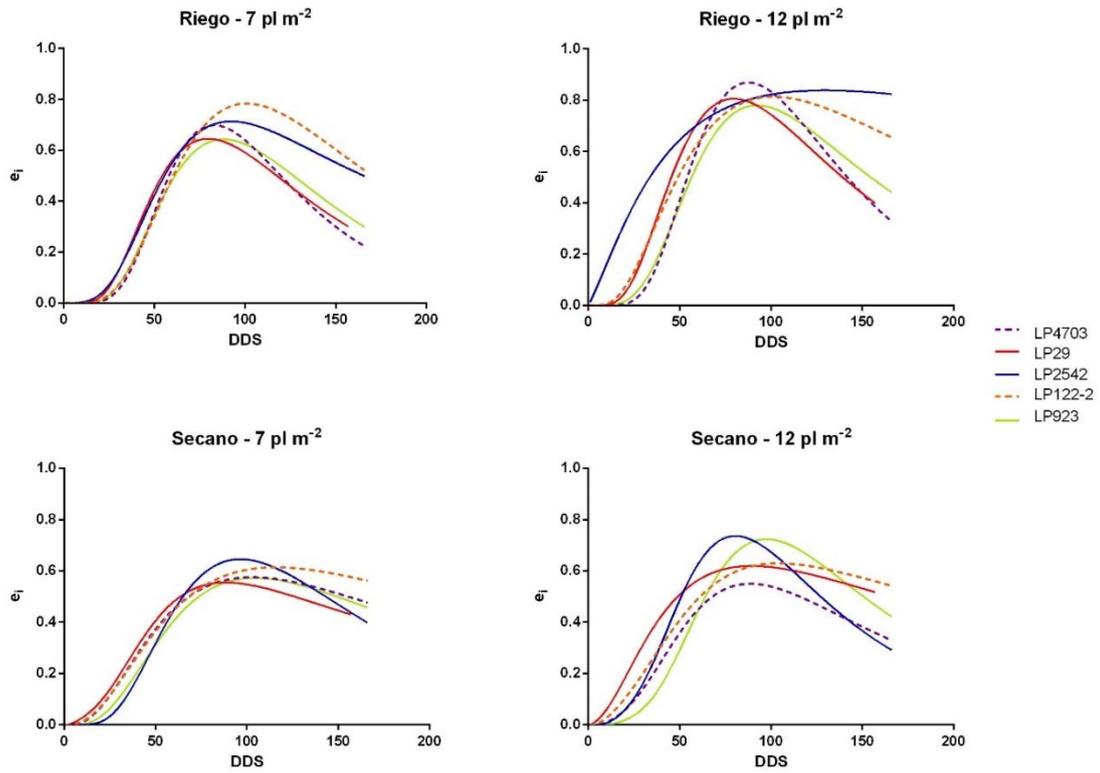


Figura 3: Eficiencia de intercepción de la radiación ( $e_i$ ) en función de los días desde la siembra (DDS) de las 5 líneas evaluadas, en las 4 condiciones de cultivo (disponibilidad hídrica  $\times$  densidad).

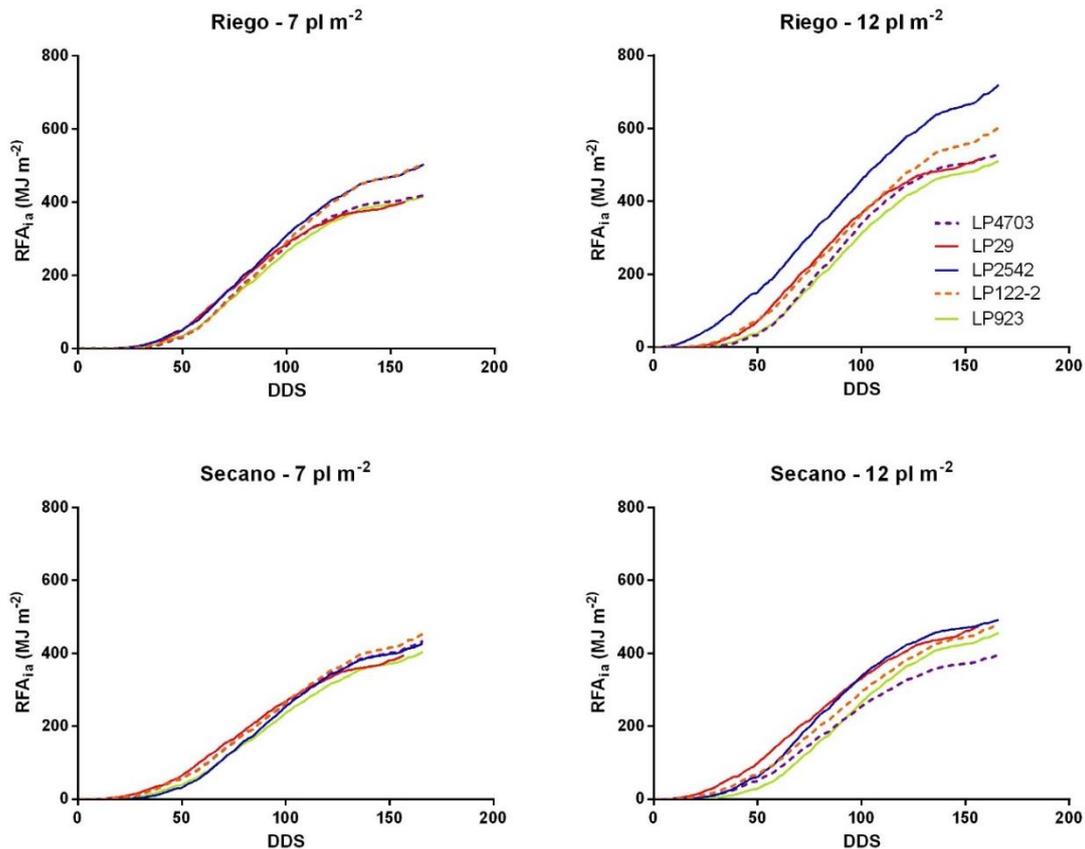


Figura 4: Radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RFAia) en función de los días desde la siembra (DDS) de las 5 líneas evaluadas, en las 4 condiciones de cultivo (disponibilidad hídrica × densidad).

### 3.4- Captura y eficiencia de uso del agua

Los mayores valores de evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua se obtuvieron en las parcelas bajo riego en alta densidad. Así, LP4703 obtuvo en esta condición la mayor evapotranspiración y LP2542 fue la línea que registró la mayor eficiencia en el uso del agua (Tabla 3).

Los resultados del análisis de varianza muestran que no hubo diferencias significativas para la cantidad de agua evapotranspirada entre los genotipos, pero sí para la interacción entre condición hídrica × densidad (Tabla 2), donde las parcelas bajo riego, en ambas densidades, obtuvieron los mayores valores

(Anexo 8.b) (Tabla 3). En el caso de la eficiencia de uso del agua sí hubo diferencias significativas entre genotipos y las distintas condiciones hídricas (Tabla 2), donde LP2542 bajo riego registró el mayor valor promedio (21,99 kg de grano  $\text{mm}^{-1}$ ) (Anexo 9.b).

A su vez, no se encontraron diferencias significativas entre los genotipos en la capacidad de extracción de agua a distintas profundidades del perfil, solo en la profundidad de 120-180 cm, LP4703 se diferenció significativamente de LP122-2 en la condición de riego y baja densidad (Figura 5).

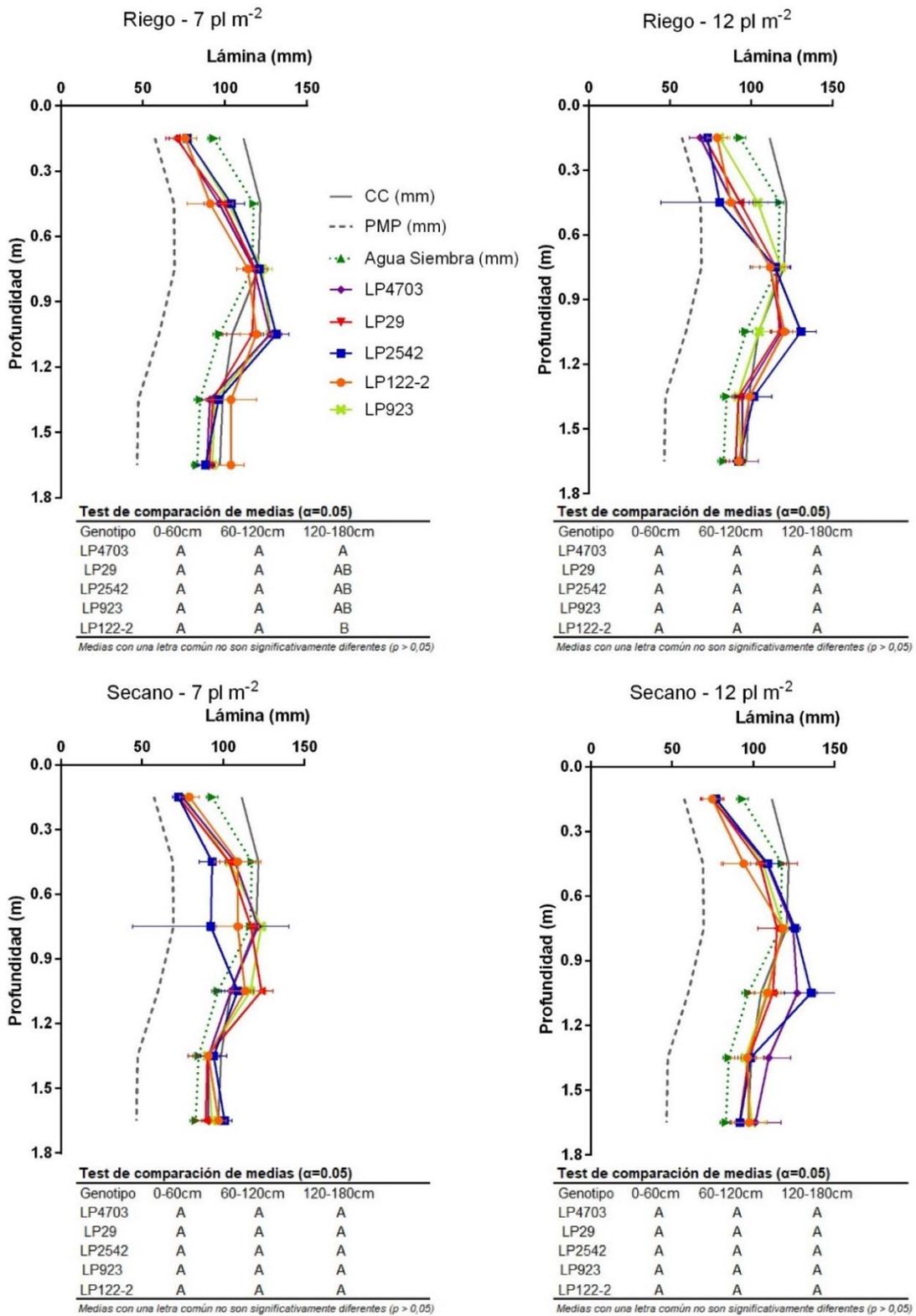


Figura 5: Lámina de agua para las distintas profundidades del perfil de suelo. Se muestran los test de comparación de medias para las combinaciones de condición hídrica x densidad de siembra.

### **3.5- Análisis de componentes principales**

En el análisis de componentes principales, las dos primeras componentes explicaron el 90 % de la variabilidad presente en el conjunto de datos analizados (Anexo 10.b) y fueron empleadas para construir el biplot que permitió visualizar las diferencias entre genotipos y su relación con las variables. La componente principal 1 (CP1) está dada fundamentalmente por NGP, ET, EUA y Rto ha<sup>-1</sup>. En la componente principal 2 (CP2) las variables más influyentes fueron PG, ASI, fRFAim, RFAia (Figura 6, Anexo 10.a).

La línea LP2542 mostró ser un genotipo de alto rendimiento, asociado a un alto número de granos por planta y a variables asociadas a la captura de radiación (RFAia y fRFAim) y EUA. LP923, también registró altos rendimientos, asociados al peso de los granos, eficiencia en el uso del agua y bajo ASI. La línea LP122-2, al contrario, demostró ser un genotipo de bajo rendimiento y alto ASI, mientras que LP29 y LP4703 presentaron niveles intermedio-bajos e de rendimiento. A su vez, LP29 registró alto peso de los granos y alta ET.

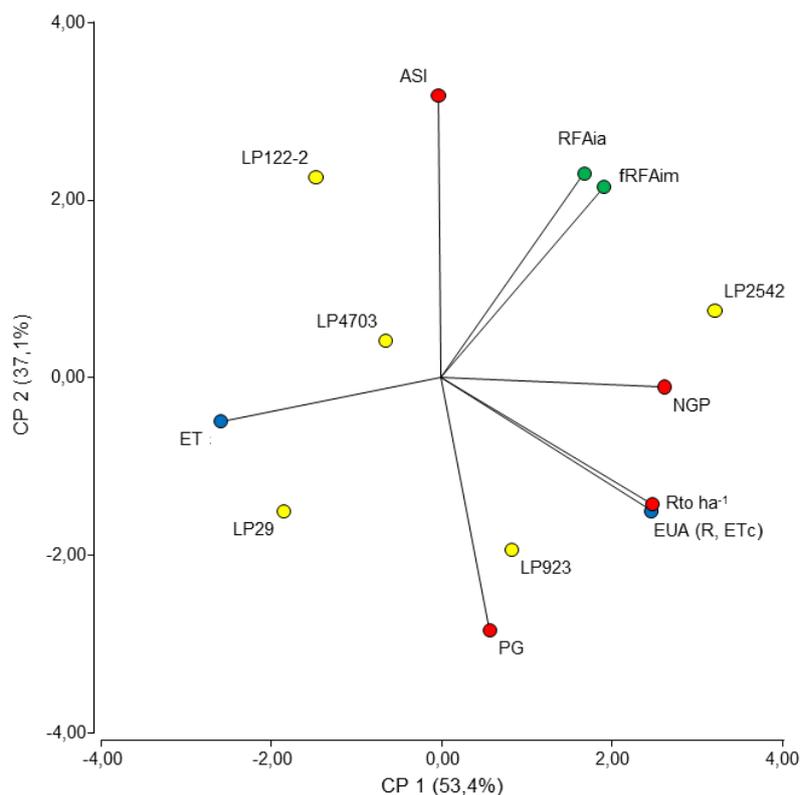


Figura 6: Biplot de las componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2, respectivamente). Los círculos amarillos simbolizan a las líneas (LP29, LP122-2, LP4703, LP923, LP2542). Los vectores finalizados en círculos rojos, verdes y azules representan las variables analizadas, asociadas al rendimiento y sus componentes, captura de luz y captura y eficiencia de uso del agua, respectivamente. ASI: intervalo antesis-silking (días), ET: evapotranspiración del cultivo entre emergencia y madurez fisiológica (mm), EUA: eficiencia de uso del agua ( $\text{kg grano ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ), fRFAim: fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima, NGP: número de granos por planta, PG: peso individual de los granos (mg), RFAia: radiación fotosintéticamente activa interceptada entre emergencia y madurez fisiológica ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), RGP: rendimiento en grano por planta (g), Rto  $\text{ha}^{-1}$ : rendimiento por hectárea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

#### 4- DISCUSIÓN

El presente experimento permitió realizar una caracterización fenotípica en condiciones de campo y típicas de la región Pampeana, en un grupo de líneas previamente seleccionadas por su comportamiento contrastante frente a condiciones de estrés hídrico (Muller *et al.*, 2010; Ruiz y Eyhérbide, 2015). Este trabajo profundiza en el fenotipado de rasgos relacionados con la captura de recursos (*i.e.*, radiación y agua), y se diferencia de trabajos previos por las condiciones experimentales en que fue realizado, ya que esos experimentos fueron llevados a cabo en macetas (Muller *et al.*, 2010) o en una situación agroecológica como la de San Juan, que facilita desde un punto de vista experimental la generación del estrés con la intensidad y duración deseadas por el investigador, pero que no reflejan la situación agroclimática de la región Pampeana (Ruiz y Eyhérbide, 2015).

Al comparar los resultados obtenidos en las combinaciones de los factores condición hídrica × densidad de siembra se hallaron diferencias en las variables analizadas. En la condición más adversa para el cultivo, secano × 12 pl m<sup>-2</sup>, se registraron los menores valores en 8 de 9 variables (RGP, Rto ha<sup>-1</sup>, NGP, PG, ASI, fRFAim, ET y EUA). Por el contrario, en el mejor ambiente (riego × 7 pl m<sup>-2</sup>), se obtuvieron los máximos registros en 3 de los 9 caracteres estudiados (RGP, NPG y ASI). Esto demuestra que condiciones desfavorables para el crecimiento y desarrollo del cultivo, producidas por efecto del estrés (*i.e.*, hídrico y por densidad), tienen un gran impacto en la captura y eficiencia de uso de los recursos durante el ciclo del cultivo, como así también en la generación del rendimiento y sus componentes (Cirilo *et al.*, 2012; Earl y Davis, 2003).

En cuanto a la primera hipótesis de trabajo planteada, se logró determinar la existencia de variabilidad en la mayoría de los atributos evaluados y se pudo diferenciar a las líneas por su comportamiento ante estrés y por sus valores fenotípicos para dichos atributos. Esto indica la presencia de variabilidad genotípica para los atributos relacionados con la captura de recursos y, por ende, no se rechaza la primera hipótesis, excepto para el consumo de agua y los perfiles de extracción de agua del suelo. La ausencia de diferencias entre genotipos para estos caracteres puede deberse, al menos en parte, a las precipitaciones, que si bien en el período crítico fueron escasas (36 mm), durante el ciclo del cultivo fueron abundantes (712,5 mm). Por otro lado, el consumo de agua se estimó como la evapotranspiración del cultivo, la cual no diferencia el agua perdida por evaporación directa de aquella que es efectivamente transpirada a través del canopy. Dadas las frecuentes precipitaciones durante el ciclo y la baja cobertura alcanzada, dado que ningún genotipo alcanzó el IAF crítico, es esperable que la componente evaporativa haya sido importante, especialmente en aquellos genotipos de menor cobertura (Allen *et al.*, 2006).

Centrándonos en los genotipos considerados como tolerantes al estrés, la línea LP2542, un material considerado previamente con alta tolerancia al estrés hídrico (Ruiz y Eyherabide, 2015), presentó los mayores valores medios de rendimiento bajo condiciones favorables, fuertemente asociado a un alto número de granos por planta, a variables asociadas a la captura de radiación (RFA<sub>ia</sub> y fRFA<sub>im</sub>) y a valores muy altos de EUA bajo buenas condiciones hídricas. Esto coincide con lo reportado en la bibliografía, que muestra que en el cultivo de maíz utilizando la mejor tecnología disponible y en ausencia de

limitaciones hídricas, sanitarias o nutricionales, un mayor rendimiento está asociado a altas tasas de crecimiento del cultivo en el período crítico, junto con temperaturas moderadas y alta radiación incidente, acompañadas por canopeos eficientes en capturarla (Muchow *et al.*, 1990; Andrade., 1992; Cirilo *et al.*, 2012).

Por otro lado, LP923, considerada moderadamente tolerante por Ruiz y Eyherabide (2015), demostró ser un genotipo de alto rendimiento y gran estabilidad en la mayoría de los caracteres analizados. Su alta estabilidad del rendimiento puede estar asociada al número y peso de los granos y a la eficiencia en el uso del agua, que no varió entre condiciones hídricas (Anexo 9.b). El genotipo LP122-2 (intermedio) fue el de menor rendimiento en todas las combinaciones de condición hídrica x densidad, lo cual determinó que fuera también el de menor EUA. Las líneas LP29 (susceptible al estrés hídrico) y LP4703 (tolerante) presentan niveles intermedios de rendimiento en riego x baja densidad, pero baja estabilidad al pasar a una condición más estresante.

En cuanto a la segunda hipótesis de trabajo, no fue posible establecer que el comportamiento diferencial en situaciones de estrés estuviera asociado a la exploración del perfil lograda por las raíces y a una consiguiente mayor capacidad de extracción de agua del suelo. Es posible que los efectos previamente mencionados de las abundantes precipitaciones y su efecto sobre la evaporación directa hayan afectado las estimaciones de evapotranspiración y, a su vez, recargado el perfil del suelo durante el ciclo del cultivo, dificultando visualizar de manera indirecta el enraizamiento de los diferentes genotipos a través de los cambios en el contenido de agua de los diferentes estratos del suelo. A pesar de que durante el período crítico hubo cierto nivel de déficit

hídrico, que afectó a los genotipos en los valores observados de rendimiento, sus componentes numéricos y los caracteres asociados a la captura de luz, no fue suficiente para permitir visualizar diferencias en la evapotranspiración y los perfiles de agua en madurez fisiológica.

## **5- CONCLUSIÓN**

Los resultados obtenidos muestran que existe variabilidad genotípica para los caracteres estudiados y que varios de ellos están fuertemente asociados a la determinación del rendimiento. Con el fin de confirmar lo concluido, se recomienda repetir el experimento manteniendo los tratamientos de estrés hídrico y densidad. A su vez, sería deseable ampliar el número de genotipos evaluados, de modo de contar con una mejor representación de la variabilidad genética disponible en el programa de mejoramiento. Por otro lado, una vez identificados rasgos que estén correlacionados con una mayor tolerancia a estrés, y que a su vez sean fácilmente medibles en un elevado número de genotipos, debiera evaluarse la naturaleza genética de los mismos, caracterizar la presencia de efectos aditivos y no aditivos en su determinación y cuantificar la heredabilidad de los mismos.

## **6- BIBLIOGRAFÍA**

- Allen, RG.; Luis, S.; Pereira, DR. y Martin, S. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 56. Roma.
- Andrade, FH. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín Técnico 106. Est. Exp. Agr. Balcarce, Argentina. 16 pp.
- Andrade, FH.; Cirilo, A.; Uhart, S. y Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de Maíz. Editorial La Borrosa y Dekalb Press, Argentina.
- Andriani, JM. 2000. Crecimiento de las raíces en los principales cultivos extensivos en suelos hapludoles de la provincia de Santa Fé. En: El agua en los sistemas productivos para mejorar la producción. INTA EEA Oliveros, Santa Fé, Argentina. Publicación N° 13:35-39.
- Boyer, JS. 1982. Plant productivity and environment. Science 218:443-448.
- Carretero, R.; Bert, FE. y Podestá, G. 2014. Maize root architecture and water stress tolerance: an approximation from crop models. Agronomy Journal 106: 2287-2295.
- Cárcova, J.; Abeledo, G. y Lopez Pereira, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: Satorre, E.; Benech Arnold, R.; Slafer, G.; De la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M. y Savin, R. (eds). Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 73-98.
- Cirilo, A.; Andrade, F.; Otegui, M.; Maddonni, G.; Vega, C. y Valentinuz, O. 2012. Ecofisiología del cultivo de maíz. En: Eyhéabide, GH. (ed.). Bases para el manejo del cultivo de maíz. Ediciones INTA. pp. 25-56.

- Dardanelli, J.; Collino, D.; Otegui, ME. y Sadras, VO. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre, E.; Benech Arnold, R.; Slafer, G.; De la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M. y Savin, R. (eds). Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 325-386.
- De Dorlodot, S.; Forster, B.; Pagès, L.; Price, P.; Tuberosa, R. y Draye, X. 2007. Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science*. 12: 474-481.
- Di Rienzo, JA.; Casanoves, F.; Balzarini, MG.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, CW. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Duvick, DN. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in agronomy* 86: 83-145.
- Earl, HJ. y Davis, RF. 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal* 95: 688-696.
- FAOSTAT. 2019. Food and Agriculture Organization of the United Nations – Statistics Division. Disponible online en: [.fao.org/faostat/es/](http://www.fao.org/faostat/es/) (fecha de acceso: 25 de septiembre de 2019).
- Galizia, LA.; D'Andrea, KE.; Cirilo, AG. y Otegui, ME. 2014. Consumo de agua a floración en el cultivo de maíz: Análisis de líneas endocriadas y sus híbridos derivados en un experimento dialélico. X Congreso Nacional de Maíz. 3 al 5 de Septiembre de 2014, Rosario, Santa Fé, Argentina.
- Galizia, LA.; D'Andrea, KE.; Cirilo, AG. y Otegui, ME. 2015. Field-based phenotyping of maize roots functionality for the analysis of its genetic control.

- 1st Latin American Conference on Plant Phenotyping and Phenomics for Plant Breeding. 30 de Noviembre al 2 de Diciembre de 2015, Talca, Chile.
- Kruk, B. y Satorre, E. 2003. Densidad y arreglo espacial del cultivo. En: Satorre, E.; Benech Arnold, R.; Slafer, G.; De la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M. y Savin, R. (eds). Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad agronomía, Universidad de Buenos Aires. pp. 277-316.
- Magrin, GO.; Grondona, MO.; Travasso, MI.; Boullon, DR.; Rodríguez GR. y Messina CD. 1998. Impacto del fenómeno “El Niño” sobre la producción de cultivos en la Región Pampeana. INTA, Instituto de Clima y Agua, Castelar, Argentina.
- MAGYP. 2019. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Estimaciones Agrícolas. Disponible online en: <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/> (fecha de acceso: 25 de septiembre de 2019).
- Muchow, RC.; Sinclair, TR. y Bennett, JM. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agronomy Journal* 82: 338-343.
- Muller, C.; Valentinuz, O. y Eyhérbide, GH. 2010. Líneas de maíz difieren en caracteres fisiológicos asociados con el crecimiento. En actas del IX Congreso Nacional de Maíz. Simposio de Sorgo, Rosario, Argentina.
- Nilsen, ET. y Orcutt, DM. 1996. *Physiology of plants under stress*. John Willey and Sons, Inc.
- Passioura, JB. 1996. Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation*, 20 (2): 79-83.

- Passioura, JB. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Functional Plant Biology* 29: 537–546.
- Raper, CD. y Barber SA. 1970. Rooting systems of soybeans. I. Differences in root morphology among varieties. *Agronomy Journal*, 62: 581-584.
- Ritchie, JT. y NeSmith, DS. 1991. Temperature and crop development. En: Hanks, J. y Ritchie, JT. (eds.), *Modelling plant and soil systems*. American Society of Agriculture, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. *Agronomy Series* 31, Madison, WI. EEUU. pp. 5-29.
- Ritchie, SW. y Hanway, JJ. 1982. How a plant crop develops. Special Report. 48. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa.
- Ruiz, MB. y Eyhérabide, GH. 2015. Screening of maize inbred line and hybrids under managed drought stress. En: *Actas de 1<sup>st</sup> Latin American Conference on Plant Phenotyping and Phenomics for Plant Breeding*, Talca, Chile.
- Sadras, VO.; Hall, AJ.; Trapani, N. y Villela, F. 1989. Dynamics of rooting and root-length: leaf-area relationships as affected by plant population in sunflower crops. *Field Crops Research*, 22: 45-57.
- Tetio-Kagho, F. y Gardner, F. 1988. Responses of maize to plant population density. I. Canopy development, light relationships, and vegetative growth. *Agronomy Journal*. 80: 930-935.
- Tollenaar, M. y Wu, J. 1999. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Science*. 39: 1597-1604.
- Wilkes, HG. 1979. Mexico and Central America as a centre for the origin of agriculture and the evolution of maize. *Crop Improvement*. 6: 1-18.

## 7- ANEXO

### Rendimiento por ha (kg/ha) (Rto ha<sup>-1</sup>):

Tabla 1.a: Tabla del análisis de la varianza Rto ha<sup>-1</sup> de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	3950114	2	14977836	11,86	0,001
<b>H</b>	145587007	1	1975057	696,2	<0,0001
<b>Error A (BxH)</b>	5673	2	145587007		
<b>G</b>	127057826	4	2837	0,0022	<0,0001
<b>D</b>	5017279	1	31764456	25,15	0,053
<b>G*H</b>	39562476	4	5017279	3,97	0,0001*
<b>G*D</b>	4033365	4	9890619	7,83	0,5
<b>H*D</b>	7965334	1	1008341	0,8	0,01*
<b>G*H*D</b>	11311151	4	7965334	6,31	0,08
<b>Error B</b>	45469937	36	2827788	2,24	
<b>Total</b>	389960166	59	1263053		

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 1.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción genotipo × condición hídrica. DMS (Diferencia mínima significativa) = 2185,88.

<b>Genotipo</b>	<b>Condición Hídrica</b>	<b>Medias (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>	
LP122-2	S	1904,66	6	458,81	A
LP29	S	2336,06	6	458,81	A
LP4703	S	2991,8	6	458,81	A B
LP122-2	R	3579,26	6	458,81	A B C
LP2542	S	3920,58	6	458,81	A B C
LP923	S	5049,38	6	458,81	B C D
LP4703	R	5312,33	6	458,81	C D
LP29	R	6215,92	6	458,81	D
LP923	R	6801,24	6	458,81	D
LP2542	R	9870,79	6	458,81	E

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 1.c: Prueba comparativa de Tukey de la interacción condición hídrica × densidad. DMS (Diferencia mínima significativa) = 1105,23.

<b>Condición Hídrica</b>	<b>Densidad (pl m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Medias (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>	
S	12	3165,31	15	290,18	A
S	7	3315,68	15	290,18	A
R	7	5702,38	15	290,18	B
R	12	7009,44	15	290,18	C

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

## Rendimiento en grano por planta (g) (RGP):

Tabla 2.a: Tabla del análisis de la varianza RGP de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	482	2	241,1	33,03	0,029
<b>H</b>	16399	1	16399	2246,41	0,0004
<b>Error A (BxH)</b>	14,6	2	7,3		
<b>G</b>	15220	4	3805	22,46	<0,0001
<b>D</b>	7273	1	7273	42,94	<0,0001*
<b>G*H</b>	3932	4	983	5,8	0,001*
<b>G*D</b>	574	4	143	0,85	0,5
<b>H*D</b>	16	1	16	0,09	0,76
<b>G*H*D</b>	568	4	142	0,84	0,5
<b>Error B</b>	6097	36	169		
<b>Total</b>	50575,6	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 2.b: Prueba comparativa de Tukey de la densidad ( $p < 0,0001$ ). DMS (Diferencia mínima significativa) = 6,81501.

Densidad (pl m <sup>-2</sup> )	Medias (g)	N	E.E.	
12	42,39	30	2,38	A
7	64,41	30	2,38	B

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 2.c: Prueba comparativa de Tukey de la interacción genotipo × condición hídrica.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 25,31283.

Genotipo	Condición Hídrica	Medias (g)	N	E.E.			
LP122-2	S	21,62	6	5,31	A		
LP29	S	26,99	6	5,31	A		
LP4703	S	35,44	6	5,31	A	B	
LP122-2	R	39,04	6	5,31	A	B	
LP2542	S	45,57	6	5,31	A	B	C
LP923	S	54,73	6	5,31			C D
LP4703	R	59,33	6	5,31			C D
LP29	R	68,15	6	5,31			C D
LP923	R	76,46	6	5,31			D
LP2542	R	106,7	6	5,31			E

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

### Número de granos por planta (NGP):

Tabla 3.a: Tabla del análisis de la varianza NGP de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	14751	2	7375	11,99	0,07
<b>H</b>	264667	1	264667	430,3	0,002
<b>Error A (BxH)</b>	1230	2	615		
<b>G</b>	203762	4	50940	18,97	<0,0001
<b>D</b>	106574	1	106574	39,69	<0,0001*
<b>G*H</b>	46901	4	11725	4,37	0,005*
<b>G*D</b>	21063	4	5266	1,96	0,1
<b>H*D</b>	1313	1	1313	0,049	0,4
<b>G*H*D</b>	5684	4	1421	0,53	0,7
<b>Error B</b>	96670	36	2685		
<b>Total</b>	762619	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 3.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción genotipo x condición hídrica. DMS (Diferencia mínima significativa) = 100,78884.

<b>Genotipo</b>	<b>Condición Hídrica</b>	<b>Medias</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>				
LP29	S	107,99	6	21,16	A			
LP122-2	S	144,06	6	21,16	A	B		
LP2542	S	223,18	6	21,16		B	C	
LP4703	S	223,19	6	21,16		B	C	
LP923	S	236,4	6	21,16		B	C	D
LP122-2	R	243,88	6	21,16		B	C	D
LP29	R	259,31	6	21,16			C	D
LP4703	R	310,57	6	21,16			C	D
LP923	R	327,32	6	21,16				D
LP2542	R	457,89	6	21,16				E

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: seco, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 3.c: Prueba comparativa de Tukey de la densidad ( $p < 0,0001$ ). DMS (Diferencia mínima significativa) = 27,13552.

<b>Densidad (pl m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Medias</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>	
12	211,23	30	9,46	A
7	295,52	30	9,46	B

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

### Peso de los granos (mg) (PG):

Tabla 4.a: Tabla del análisis de la varianza del PGi de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	3132	2	1566	3,32	0,2
<b>H</b>	7916	1	7916	16,77	0,054
<b>Error A (BxH)</b>	944	2	472		
<b>G</b>	81238	4	20309	32,03	<0,0001*
<b>D</b>	3229	1	12081	19,06	0,0001
<b>G*H</b>	5682	4	807	1,27	0,3
<b>G*D</b>	5178	4	1450	2,24	0,08
<b>H*D</b>	3580	1	5178	8,17	0,007*
<b>G*H*D</b>	22824	4	895	1,41	0,2
<b>Error B</b>	145806	36	634		
<b>Total</b>	145805	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 4.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción condición hídrica × densidad.  
DMS (Diferencia mínima significativa) = 24,76208.

<b>Condición Hídrica</b>	<b>Densidad (pl m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Medias (mg)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>	
S	12	169,61	15	6,5	A
R	12	211,16	15	6,5	B
S	7	216,57	15	6,5	B
R	7	220,96	15	6,5	B

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 4.c: Prueba comparativa de Tukey de los genotipos. DMS (Diferencia mínima significativa) = 29,51051.

<b>Genotipo</b>	<b>Medias (mg)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>	
LP122-2	155,43	12	7,27	A
LP4703	168,32	12	7,27	A
LP2542	215,63	12	7,27	B
LP923	232,9	12	7,27	B C
LP29	250,58	12	7,27	C

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

### Intervalo antesis – silking (días) (ASI):

Tabla 5.a: Tabla del análisis de la varianza del ASI de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	2,97	2	1,48	2,36	0,3
<b>H</b>	82,81	1	82,81	131,65	0,007
<b>Error A (BxH)</b>	1,26	2	0,63		
<b>G</b>	193,77	4	48,44	43,18	<0,0001
<b>D</b>	37,46	1	37,46	33,39	<0,0001
<b>G*H</b>	16,08	4	4,02	3,58	0,01*
<b>G*D</b>	9,5	4	2,38	2,12	0,09
<b>H*D</b>	14,01	1	14,01	12,49	0,001*
<b>G*H*D</b>	9,14	4	2,29	2,04	0,1
<b>Error B</b>	40,39	36	1,12		
<b>Total</b>	407,39	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 5.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción genotipo x condición hídrica.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 2,06005.

<b>Genotipo</b>	<b>Condición Hídrica</b>	<b>Medias (días)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>				
LP923	R	0,82	6	0,43	A			
LP29	R	1,15	6	0,43	A			
LP923	S	1,58	6	0,43	A	B		
LP2542	R	3,38	6	0,43		B	C	
LP4703	R	3,94	6	0,43			C	
LP29	S	4,54	6	0,43			C	D
LP122-2	R	5,24	6	0,43			C	D E
LP4703	S	6,26	6	0,43				D E
LP2542	S	6,92	6	0,43				E
LP122-2	S	7	6	0,43				E

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P>0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 5.c: Prueba comparativa de Tukey de la interacción condición hídrica x densidad.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 1,04160.

<b>Condición Hídrica</b>	<b>Densidad (pl m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Medias (días)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>			
R	7	2,6	15	0,27	A		
R	12	3,21	15	0,27	A	B	
S	7	3,98	15	0,27		B	
S	12	6,53	15	0,27			C

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P>0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

**Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada  
máxima (fRFAim):**

Tabla 6.a: Tabla del análisis de la varianza de la fRFAim de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	0,0026	2	0,0013	0,74	0,57
<b>H</b>	0,29	1	0,29	166,24	0,006
<b>Error A (BxH)</b>	0,0035	2	0,0017		
<b>G</b>	0,06	4	0,01	3,7	0,01
<b>D</b>	0,11	1	0,11	28,81	<0,0001*
<b>G*H</b>	0,05	4	0,01	3,04	0,03*
<b>G*D</b>	0,02	4	0,01	1,59	0,2
<b>H*D</b>	0,01	1	0,01	2,82	0,1
<b>G*H*D</b>	0,02	4	0,01	1,34	0,3
<b>Error B</b>	0,14	36	0,0039		
<b>Total</b>	0,71	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 6.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción genotipo x condición hídrica.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 0,12117.

Genotipo	Condición		Medias	N	E.E.					
	Hídrica									
LP4703	S		0,57	6	0,03	A				
LP29	S		0,6	6	0,03	A		B		
LP122-2	S		0,63	6	0,03	A	B	C		
LP923	S		0,66	6	0,03	A	B	C		
LP2542	S		0,7	6	0,03		B	C	D	
LP923	R		0,72	6	0,03		B	C	D	
LP29	R		0,73	6	0,03			C	D	
LP4703	R		0,79	6	0,03				D	
LP2542	R		0,81	6	0,03				D	
LP122-2	R		0,81	6	0,03				D	

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: seco, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 6.c: Prueba comparativa de Tukey de la densidad. DMS (Diferencia mínima significativa) = 0,03262.

Densidad (pl m <sup>-2</sup> )	Medias	N	E.E.	
7	0,66	30	0,01	A
12	0,74	30	0,01	B

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

**Radiación fotosintéticamente activa interceptada entre emergencia y madurez fisiológica (MJ m<sup>-2</sup>) (RFAia)**

Tabla 7.a: Tabla del análisis de la varianza de la RFAia de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	7616	2	3808	4,23	0,2
<b>H</b>	69799	1	69799	77,61	0,01
<b>Error A (BxH)</b>	1798	2	899		0,58
<b>G</b>	60831	4	15208	9,14	<0,0001*
<b>D</b>	86060	1	86060	51,75	<0,0001
<b>G*H</b>	15538	4	3884	2,34	0,07
<b>G*D</b>	15083	4	3770	2,27	0,08
<b>H*D</b>	16518	1	16519	9,93	0,003*
<b>G*H*D</b>	5911	4	1477	0,89	0,5
<b>Error B</b>	59873	36	1663		
<b>Total</b>	339029	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 7.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción condición hídrica × densidad.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 40,10586.

Condición Hídrica	Densidad (pl m <sup>-2</sup> )	Medias (MJ m <sup>-2</sup> )	N	E.E.		
S	7	370,76	15	10,53	A	
R	7	405,79	15	10,53	A	B
S	12	413,32	15	10,53		B
R	12	514,72	15	10,53		C

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes (P>0.05),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

Tabla 7.c: Prueba comparativa de Tukey de los genotipos. DMS (Diferencia mínima significativa) = 47,79665.

Genotipo	Medias (MJ m <sup>-2</sup> )	N	E.E.		
LP29	399,31	12	11,77	A	
LP923	400,41	12	11,77	A	
LP4703	404,31	12	11,77	A	B
LP122-2	448,52	12	11,77		B C
LP2542	478,2	12	11,77		C

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes (P>0.05),

N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

## Evapotranspiración del cultivo (mm) (ET):

Tabla 8.a: Tabla del análisis de la varianza de la ET de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	738	2	369	0,1	0,9
<b>H</b>	85923	1	85923	24,39	0,03
<b>Error</b>	<b>A</b>	7045	3522		0,03
<b>(BxH)</b>					
<b>G</b>	2097	4	524	0,57	0,7
<b>D</b>	319	1	319	0,35	0,5
<b>G*H</b>	4023	4	1006	1,1	0,37
<b>G*D</b>	5969	4	1492	1,63	0,19
<b>H*D</b>	4941	1	4941	5,38	0,02*
<b>G*H*D</b>	3669	4	917	1	0,4
<b>Error B</b>	32129	36	918		
<b>Total</b>	146857	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 8.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción condición hídrica × densidad.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 30,10221.

<b>Condición Hídrica</b>	<b>Densidad (pl m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Medias (mm)</b>	<b>N</b>	<b>E.E.</b>	
S	12	371,71	15	7,82	A
S	7	395,46	15	7,82	A
R	7	452,73	15	7,82	B
R	12	467,26	15	8,1	B

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ),

S: secano, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

**Eficiencia en el uso del agua, en kg de grano por milímetro de evapotranspiración consumido (kg de grano mm<sup>-1</sup>) (EUA):**

Tabla 9.a: Tabla del análisis de la varianza de la EUA de las cinco líneas de maíz empleadas en el ensayo.

<b>FV</b>	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>B</b>	15,4	2	7,7	1,15	0,4
<b>H</b>	392	1	392	58,58	0,01
<b>Error (BxH)</b>	<b>A</b> 13,4	2	6,7		
<b>G</b>	666	4	166	26,39	<0,0001
<b>D</b>	18	1	18	2,89	0,09
<b>G*H</b>	201	4	50	7,98	0,0001*
<b>G*D</b>	29	4	7,4	1,17	0,3
<b>H*D</b>	22	1	22	3,59	0,06
<b>G*H*D</b>	62	4	15,5	2,45	0,06
<b>Error B</b>	220	36	6,3		
<b>Total</b>	1641	59			

Referencias: FV: fuente de variación, SC: suma de cuadrados, gl: grados de libertad, CM: cuadrado medio, B: bloque, H: condición hídrica (Riego/Secano), G: genotipo, D: densidad (7/12 pl m<sup>-2</sup>), \*: fuente de variación a la cual se realizó la prueba comparativa de Tukey.

Tabla 9.b: Prueba comparativa de Tukey de la interacción genotipo x condición hídrica.

DMS (Diferencia mínima significativa) = 4,94309.

Genotipo	Condición Hídrica	Medias (kg de grano N mm <sup>-1</sup> )		E.E.	Referencias										
LP122-2	S	4,97	6	1,03	A										
LP29	S	5,93	6	1,03	A	B									
LP122-2	R	7,78	6	1,03	A	B	C								
LP4703	S	7,88	6	1,03	A	B	C								
LP2542	S	10,06	6	1,03		B	C	D							
LP4703	R	11,19	6	1,03			C	D	E						
LP29	R	13,17	6	1,03				D	E						
LP923	S	13,19	6	1,03				D	E						
LP923	R	15,05	6	1,03					E						
LP2542	R	21,99	6	1,03											F

Referencias: Medias con una letra común no son significativamente diferentes (P>0.05),

S: seco, R: riego, N: número de parcelas, E.E.: Error estándar.

**Análisis multivariado:**

A continuación, se incluyen los autovectores (para las primeras 2 componentes principales) y los autovalores obtenidos en el análisis de componentes principales.

Tabla 10.a: Autovectores del análisis multivariado: ponderación de las variables en las primeras 2 componentes principales.

<b>Variables</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>
NGP	0,46	-0,02
PG	0,10	-0,50
ASI	-0,01	0,56
fRFAim	0,33	0,38
RFAia	0,29	0,40
ET	-0,46	-0,09
EUA	0,43	-0,26
Rto ha <sup>-1</sup>	0,43	-0,25

Referencias: RGP: rendimiento en grano por planta (g), Rto ha-1: rendimiento por hectárea (kg ha-1), NGP: número de granos por planta, PG: peso individual de los granos (mg), ASI: intervalo anthesis-silking (días), fRFAim: fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima, RFAia: radiación fotosintéticamente activa interceptada entre emergencia y madurez fisiológica (MJ m-2), ET: evapotranspiración del cultivo entre emergencia y madurez fisiológica (mm), EUA: eficiencia de uso del agua (kg grano mm ET-1).

Tabla 10.b: Autovalores del análisis multivariado: proporción de la variación retenida.

<b>Lambda</b>	<b>Valor</b>	<b>Proporción</b>	<b>Proporción acumulada</b>
1	4,27	0,53	0,53
2	2,96	0,37	0,90
3	0,61	0,08	0,98
4	0,15	0,02	1,00
5	0,00	0,00	1,00

## **8- ABREVIATURAS:**

ASI: Intervalo antesis-silking

B: Bloque.

CP: Componentes principales.

CM: Cuadrado medio.

D: Densidad.

DDS: Días desde la siembra.

DMS: Diferencia mínima significativa.

E.E.: Error estándar.

ei: Eficiencia de interceptación de la radiación.

EUA: Eficiencia de uso del agua.

EUR: Eficiencia de uso de la radiación.

ET: Evapotranspiración.

fRFAim: Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada máxima.

FV: Fuente de variación.

G: Genotipo.

gl: Grados de libertad.

H: Condición hídrica.

i.e.: Es decir.

IAF: Índice de área foliar.

IC: Índice de cosecha.

MF: Madurez fisiológica.

N: Número de parcelas.

NGP: Número de granos por planta.

PG: Peso individual del grano.

Ppt: Precipitaciones.

R: Riego.

RFAi: Radicación incidente.

RFAia: Radiación interceptada acumulada a lo largo del ciclo.

RFAint: Radiación interceptada.

RGP: Rendimiento en grano por planta.

Rto ha<sup>-1</sup>: Rendimiento por hectárea.

S: Secano.

SC: Suma de cuadrados.

T: Agua transpirada.

Tmax: Temperatura máxima.

Tmedia: Temperatura media.

Tmin: Temperatura media.