



**Universidad de  
Concepción del  
Uruguay**



**Hochschule Neubrandenburg**  
University of Applied Sciences

**Respuesta relativa del rendimiento y  
arquitectura de la planta de maíz a la densidad  
de siembra**

**Autor: Ing. Agr. Doll, Juan Martín**

**Director: Ing. Agr. M. Sc. Dr. Incognito, Salvador  
Juan Pablo**

**Co-Director: Prof. Dr. Theodor Fock**

***Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Concepción de  
Uruguay-Hochschule Neubrandenburg, University of Applied Sciences***

## **Prefacio**

Esta tesis se presenta como requisito para optar al grado académico de Máster en Gestión de Cultivos Extensivos ante la Universidad de Concepción del Uruguay, Argentina, y la Universidad de Ciencias Aplicadas, Alemania. La misma fue escrita de manera independiente y sin el uso de otra que las fuentes y ayudas especificadas. El trabajo no ha sido presentado previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. En correspondencia con el artículo 22° del Reglamento de Tesis de Maestría, se establece este prefacio como declaración jurada.

## **Agradecimientos**

Queridos docentes, familiares y amigos:

Hoy quiero expresar mi más profundo agradecimiento a cada uno de ustedes por haber sido parte fundamental en mi camino hacia la obtención del título de maestría. Este logro no habría sido posible sin su apoyo, orientación y aliento a lo largo de este trayecto.

Agradezco a la compañía KWS Argentina S.A. por financiar la realización del ensayo, la toma de datos y el tiempo necesario para que el Dr. Salvador Incognito dirija académicamente esta tesis.

## Resumen

En el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en determinadas zonas de Argentina, la densidad de plantas (DP) utilizada se ha ido incrementado (MAIZAR, 2018), exponiendo al cultivo a un aumento en la competencia por los recursos disponibles y generando modificaciones en las características arquitecturales de las plantas en respuesta a cambios en el ambiente lumínico. El objetivo general de este trabajo fue caracterizar la arquitectura de las hojas, del tallo, así como los componentes numéricos del Rendimiento de Grano (RG) (número de granos y peso de grano) de 6 híbridos de maíz. Los objetivos específicos fueron: 1- Caracterizar la arquitectura de las hojas y del tallo de 6 híbridos comerciales de maíz. 2- Evaluar la importancia relativa de los componentes numéricos del RG. 3- Estudiar, a través de un índice de tolerancia (IT), la respuesta relativa de la arquitectura de la hoja, del tallo y del RG y sus componentes numéricos al incremento en la DP. 4- Generar un índice de tolerancia y rendimiento (ITR) para conocer el comportamiento de los G a través de un índice mixto que permita determinar aquellos híbridos de alta tolerancia y alto RG. 5- Correlacionar el IT de los rasgos arquitecturales evaluados con el ITR. Para cumplir dichos objetivos se evaluaron seis híbridos comerciales de maíz provenientes de la empresa KWS. El experimento se llevó a cabo durante la campaña agrícola 2021/2022 en el campo experimental de KWS Argentina, en la localidad de Manuel Ocampo, Buenos Aires. Los híbridos de maíz fueron cultivados en tres DP contrastantes: 7.7, 9 y 13 pl m<sup>-2</sup> (D7.7, D9 y D13, respectivamente) siguiendo un diseño de parcelas divididas con 3 repeticiones. Los efectos de la DP, genotipos (G) y su interacción sobre los rasgos medidos se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANVA). Las relaciones entre variables se analizaron mediante el análisis de regresión.

Existieron diferencias significativas en la arquitectura de las hojas y del tallo entre los 6 híbridos comerciales de maíz estudiados. Estas diferencias permitieron reunir a los G en diferentes grupos arquitecturales. Los G evaluados tuvieron similar RG, sin embargo presentaron diferentes estrategias en cuanto a NG y PG para generar al mismo. Se encontraron diferencias significativas en el PG en D7.7, siendo el NG el único componente que se asoció positiva y significativamente con el RG en las tres DP evaluadas.

Ciertos G tuvieron una mayor capacidad de adaptación a ambientes de alta densidad de plantas (AP), lo que se tradujo en un IT por encima de 1, observándose una tendencia del G2 y G6 hacia una mayor tolerancia al estrés en varias características asociadas a la arquitectura de la hoja y del tallo. Existieron G más tolerantes a la competencia por recursos que pudieron mantener el IT RG por encima de 1, mientras que el IT PG fue el componente del RG más estable ante aumentos en la DP. Adicionalmente, se encontraron relaciones significativas entre el ITR con el IT del largo al quiebre de la hoja (LQ) y el IT a la relación entre la altura de planta desde superficie del suelo hasta la última hoja y la altura de planta desde superficie del suelo hasta la inserción de la espiga (AE/AP). Esto sugiere que la tolerancia a ciertos rasgos arquitecturales pueden estar relacionados con un mayor RG en ambientes de alta DP. Estos rasgos identificados pueden considerarse atributos deseables en la selección de cultivos que se enfrentan a intensa competencia por recursos.

**Palabras clave:** Maíz, Caracteres Arquitecturales, Densidad de Plantas, Índice de Tolerancia, Índice de tolerancia y rendimiento.

**Keywords:** Corn, Architectural Traits, Plant Density, Tolerance Index, Tolerance and Yield Index

## Índice de contenido

Introducción .....	13
Introducción general .....	13
Caracteres arquitecturales relacionados a la tolerancia al incremento en la densidad de plantas .....	15
Objetivos generales y específicos .....	17
Objetivo general .....	17
Objetivos específicos .....	17
Hipótesis .....	18
Metodología .....	19
Diseño experimental .....	19
Mediciones .....	20
Caracteres morfológicos asociados con la estructura de la hoja .....	20
Caracteres morfológicos asociados con la estructura del tallo .....	21
Rendimiento de grano y sus componentes numéricos .....	21
Análisis de datos .....	21
Resultados .....	23
Características Ambientales .....	23
Caracterización morfológica de los híbridos de maíz .....	24
Arquitectura de la hoja .....	24
Arquitectura del tallo .....	30
Rendimiento de grano y sus componentes numéricos .....	32
Índice de tolerancia al estrés .....	33
Arquitectura de hoja .....	33
Arquitectura de tallo .....	31
RG y componentes numéricos .....	32
Índice de tolerancia y rendimiento (ITR) .....	33
Discusión .....	38
Conclusiones .....	46
Bibliografía .....	47

## Índice de abreviaturas

AE: Altura de planta desde superficie del suelo hasta la inserción de la espiga

AF: Área foliar

AFpl: Área foliar por planta

AH: Ancho máximo de la hoja

AP: Altura de planta desde superficie del suelo hasta la última hoja

AP/AE: Relación entre la altura de planta desde superficie del suelo hasta la última hoja y la altura de planta desde superficie del suelo hasta la inserción de la espiga

AI: Ángulo de inserción foliar

DP: Densidad de plantas

D7.7: Densidad de 7.7 pl m<sup>-2</sup>

D9: Densidad de 9 pl m<sup>-2</sup>

D13: Densidad de 13 pl m<sup>-2</sup>

DT: Diámetro del tallo

G: Genotipos

HE: Hoja de inserción de espiga

HVT: Hojas verdes totales

IT: Índice de tolerancia a la sequía

ITR: índice de tolerancia y rendimiento

LH: Largo máximo de la hoja

LQ: Largo al quiebre de la hoja

NG: Número de granos

NGP: Número de granos por planta

PC: Período crítico

PG: Peso de grano

RG: Rendimiento de grano

RGP: Rendimiento de grano por planta

TCPpc: Tasa de crecimiento durante el período crítico

VOH: Valor de orientación de la hoja

VOH<sub>I</sub>: Valor de orientación de la hoja del estrato inferior de la planta

VOH<sub>S</sub>: Valor de orientación de la hoja del estrato superior de la planta

## Índice de figuras

**Figura 1A:** Evolución de temperatura media diaria durante el ciclo del cultivo de maíz en el campo experimental de KWS Argentina, en la localidad de Manuel Ocampo, Buenos Aires (Campaña 2021/2022).

**Figura 1B:** Registro de precipitaciones durante el ciclo del cultivo de maíz en el campo experimental de KWS Argentina, en la localidad de Manuel Ocampo, Buenos Aires (Campaña 2021/2022).

**Figura 2A:** Valor promedio de Área foliar (AF; DMS: 64.7 cm), de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 2B:** Valor promedio del Ancho máximo de la hoja (AH; DMS: 1.03 cm) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 2C:** Valor promedio del Largo de la hoja (LH; DMS: 4.39 cm) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 3A:** Valor promedio del Valor de orientación de la hoja (VOH; DMS: 8.39°), de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.



**Figura 3B:** Valor promedio de B) Valor de orientación de las hojas del estrato superior de la planta (VOHs; DMS: 7.02) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 3C:** Valor promedio del Valor de orientación de las hojas del estrato inferior de la planta (VOHi; DMS: °13.60) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 4A:** Valor promedio del Ángulo de inserción de la hoja (AI; DMS: 4.59°) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en la D7.7.

**Figura 4B:** Valor promedio de la Relación entre el largo de la hoja hasta el punto de quiebre y el largo máximo de la hoja (LQ/LH; DMS: 0.06) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en la D7.7.

**Figura 4C:** Valor promedio del LQ (DMS: 7.18 cm) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en la D7.7.

**Figura 5A:** Variación del Área foliar (AF) de cada una de las hojas de la planta de los 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6, indicados con líneas de colores) en la D7.7.

**Figura 5B:** Variación del Porcentaje de área foliar acumulada (AF%) de cada una de las hojas de la planta de los 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6, indicados con líneas de colores) en la D7.7.

**Figura 6A:** Valor promedio de la Relación entre la altura a la inserción de espiga (AE) y la altura total de la planta (AP) (AE/AP); Diferencia mínima significativa (DMS):0.06 de 6 híbridos comerciales de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) cultivados en D7.7.

**Figura 6B:** Valor promedio de AE (DMS: 8.29 cm), de 6 híbridos comerciales de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) cultivados en D7.7

**Figura 6C:** Valor promedio de AP (DMS: 14.15 cm) de 6 híbridos comerciales de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) cultivados en D7.7.

**Figura 6D:** Diámetro del tallo (DT; DMS: 0.3mm) de 6 híbridos comerciales de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) cultivados en D7.7.

**Figura 7A:** Valor promedio del Rendimiento de grano (RG; DMS: 34.04 g), de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 7B:** Valor promedio del Número de granos (NG; DMS: 161.51 granos) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 7C:** Valor promedio del Peso de grano (PG; DMS: 43.25 mg) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7.

**Figura 8:** Valor del índice de tolerancia del Área foliar (AF), Ancho máximo de la hoja (AH) y Largo de la hoja (LH) en A) D9 y B) D13. Variación del índice de tolerancia del Valor de orientación de la hoja (VOH), Ángulo de inserción de la hoja (AI), Relación entre el largo de la hoja hasta el punto de quiebre (LQ) y el largo máximo de la hoja (LH) y LQ en C) D9 y D) D13, de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) indicados con barras de colores.

**Figura 9:** Variación del índice de tolerancia de la relación entre el cociente de la altura a la inserción de espiga (AE) y la altura total de la planta (AP) (AE/AP), AE, AP y Diámetro del tallo (DT) en A) D9 y B) D13, de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) indicados con barras de colores.

**Figura 10:** Variación del índice de tolerancia del Rendimiento de grano (RG), Número de granos (NG) y Peso de grano (PG) en A) D9 y B) D13, de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) indicados con barras de colores.

**Figura 11A:** Relación entre el índice de tolerancia y rendimiento (ITR) con el índice de tolerancia del largo al quiebre de la hoja (ITLQ; círculos llenos verdes) en D9. Cada punto representa a cada uno de los G evaluados.

**Figura 11B:** Relación entre el índice de tolerancia y rendimiento (ITR) con índice de tolerancia para la relación entre la altura a la inserción de la espiga y la altura de la planta a última hoja (ITAE/AP; círculos llenos rojo) en D9. Cada punto representa a cada uno de los G evaluados.

**Figura 12A:** Relación entre el Rendimiento de grano (RG) con el Número de granos por planta (NG). Los colores representan cada DP, D7.7, D9 y D13. Cada punto representa a los híbridos en cada DP.

**Figura 12B:** Relación entre el Rendimiento de grano (RG) con el Peso de grano por planta (PG). Los colores representan cada DP, D7.7, D9 y D13. Cada punto representa a los híbridos en cada DP.

**Figura 13:** Relación entre el índice de tolerancia y rendimiento (ITR) con el índice de tolerancia al número de granos (ITNG). D9 y D13 están representadas con líneas de colores (rojo y verde, respectivamente). Cada punto representa a los genotipos en cada DP.

## Índice de tablas

**Tabla I:** Orden de mérito del índice de tolerancia y rendimiento (ITR) de los seis genotipos (G) evaluados ante ambientes de media densidad de plantas (D7-D9) y alta densidad de plantas (D7-D13)

## Introducción

### Introducción general

Los cereales son la fuente de alimentación más importantes de la dieta humana (FAO, 2014). A nivel mundial, el maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo de mayor producción y consumo (FAOSTAT, 2020). Son estas características las que convierten al maíz y sus derivados en componentes fundamentales para las negociaciones entre países alrededor del mundo.

La agricultura es uno de los pilares más importantes de la economía Argentina ya que el sector agroindustrial genera el 60% del total de las exportaciones (BCR, 2019). Actualmente el maíz representa el 64% de los granos del complejo agroexportador (BCR, 2021) y posiciona a la Argentina en el segundo lugar del ranking mundial de países exportadores de maíz (FAO, 2011). Además, es el cultivo de mayor producción de grano a nivel nacional con aproximadamente 58.300.000 de toneladas generadas durante la última campaña (FAOSTAT, 2020).

El aumento de la población mundial genera un incremento en la demanda de productos agropecuarios como el grano de maíz, cuyo principal destino es el consumo humano y animal, así también como la producción de biocombustibles (MEcon, 2019). Por estos motivos, se prevé que la producción mundial de maíz crecerá 193.000.000 de toneladas y llegará a 1.315.000.000 de toneladas durante el próximo decenio (OCDE-FAO, 2020), generando una necesidad imperiosa de aumentar la producción de maíz en los años venideros. Para satisfacer las demandas actuales y futuras de cereales, la productividad por unidad de superficie (i.e., el rendimiento de

grano [RG]) debe incrementarse, para evitar el avance de la agricultura sobre tierras más frágiles (Tilman et al., 2011; Andrade, 2016; FAO 2017).

El aumento del RG podría lograrse a través del mejoramiento genético y/o una optimización de las prácticas de manejo. Dentro de estas últimas, la densidad de plantas (DP) constituye una de las más importantes, ya que a lo largo de las décadas ha producido un impacto significativo sobre el RG en los cinturones maiceros del mundo (Sangoi et al., 2002; Duvick, 2005; Lashkari et al., 2011). El incremento en la DP, disminuye la disponibilidad de recursos por planta, disminuyendo su tasa de crecimiento durante el período crítico [TCP<sub>pc</sub>, i.e., 15 días centrados en la floración femenina o R1 (Ritchie et al., 1993)], pero aumenta la tasa de crecimiento del cultivo y el número de grano (NG) por unidad de superficie (Andrade et al., 1993; Westgate et al., 1997; Andrade et al., 1999b; Andrade et al., 2000; Maddonni et al., 2001b; Maddonni y Otegui, 2004) hasta un punto en el cual el RG por planta cae produciendo consecuentemente la caída del RG del cultivo. Sin embargo, el mejoramiento genético ha trabajado sobre los caracteres arquitecturales de los híbridos de maíz incrementando su plasticidad arquitectural, confiriéndoles una mayor capacidad de adaptación ante el incremento de la DP, aumentando la eficiencia en el uso de los recursos disponibles, principalmente por una mejor distribución de la radiación solar en los diferentes estratos del canopeo, condicionada por una estructura de planta más compacta y hojas más erectófilas que contribuyen al menor sombreado generado entre las plantas (Lee y Tollenaar, 2007).

## **Caracteres arquitecturales relacionados a la tolerancia al incremento en la densidad de plantas**

En el cultivo de maíz, aumentos en la radiación solar interceptada por planta se correlacionan con aumentos en la tasa fotosintética y en la materia seca generada durante el ciclo del cultivo, traduciéndose en aumentos en el RG (Andrade, 1994; Yang et al., 2021). En ambientes de altas DP, Du et al., 2021 encontraron que el aumento en la captura de la radiación fue el principal factor responsable en el incremento del RG. La radiación solar interceptada por el cultivo de maíz está determinada por la dimensión, la arquitectura y la distribución del área foliar (AF) (Stewart et al., 2003; Huang et al., 2017).

El AF se encuentra determinada por el largo (LH) y el ancho de la hoja (AH), y disminuye ante el incremento de la DP (Razquin et al., 2017). El ángulo de inserción foliar (AI) es un parámetro habitualmente utilizado para caracterizar al canopeo del cultivo. A medida que los AI son menores, el carácter de la planta se torna más erectófilo, rasgo que muchas veces se asocia con mayores RG, posiblemente por una disminución en el sombreado generado entre las hojas de la misma planta que se traduce en una mayor eficiencia en el uso de la radiación (Sánchez Mendoza, et al., 2017). Sin embargo, no siempre el largo total de la hoja (LH) se encuentra expuesta con el mismo AI. Por esta razón, el valor de orientación de las hojas (VOH) es un indicador más eficiente de la compacidad de las plantas, ya que determina la proporción de la hoja que es expuesta con el AI medido a través de la corrección multiplicativa de este parámetro con la relación entre el largo de la hoja hasta el punto de quiebre (LQ) y el LH (Ku et al., 2010). Gou et al., 2017 encontraron que la principal respuesta de la arquitectura de la planta de maíz a las elevadas DP fue

un aumento en el VOH de las hojas por encima de la espiga, generando una estructura de planta más compacta, no solamente por una disminución en el AI, sino también porque la mayor parte de esa hoja estuvo expuesta con el ángulo medido.

Adicionalmente, Incognito (2019) reportó que dentro de los genotipos que evaluó, el híbrido más nuevo sostuvo una elevada AF por planta y una estructura de planta más compacta en alta DP, debido a un mayor VOH en todos los estratos del canopeo, que permitió sostener una similar atenuación de radiación a la de los demás genotipos con menor AFpl. En ambientes de alta DP, los mayores VOH se asociaron con mayores TCPpc y una mayor eficiencia reproductiva de la espiga apical mediante su efecto directo principalmente en el estrato inferior e indirecto a través del AF del estrato medio.

Altas DP generan cambios en la altura de la planta (AP), la altura de inserción de espiga (AE) como así también el diámetro de la base del tallo (DT; Tetio-Kagho y Gardner, 1988; Turgut et al., 2005; Ramírez, 2017). La AP y AE aumentan con el incremento de la DP mientras que los tallos se afinan como una respuesta fotomorfogénica al ambiente lumínico. Por cambios desproporcionales en la AP y AE, la relación AE/AP puede modificarse en diferentes sentidos y consecuentemente, si aumenta, podría provocar una mayor tendencia al vuelco y quebrado producto de un mayor efecto de palanca sobre los entrenudos del tallo ubicados por debajo de la espiga.

En el cultivo de maíz, el rendimiento de grano (RG) se encuentra mayormente asociado a variaciones en el número de granos (NG) cosechados (Claasen y Shaw, 1970; Hall et al., 1981, Otegui et al., 1995; Bolaños y Edmeades, 1996), sin embargo tanto el NG como el peso de grano (PG), afectan el RG final (Borrás y Gambín 2010). Ambos componentes se ven fuertemente condicionados por la deficiencia en la



disponibilidad de recursos en diferentes momentos del ciclo que puede ser ocasionada por una alta DP (Cantarero et al., 2000; Echarte et al., 2000, Cerrudo et al., 2013).

Varios autores han determinado que el incremento en la DP genera cambios en la arquitectura de la planta de maíz, inducida por la competencia de recursos. Sin embargo, existen escasos trabajos que reflejen la respuesta arquitectural de los híbridos de maíz no solo a través de sus rasgos arquitecturales sino también a través de un índice de tolerancia (IT) al pasar de ambientes de baja DP (no estresantes) a otros de alta DP (estresantes). Por ello se torna interesante generar información acerca de la respuesta relativa de los caracteres arquitecturales de los híbridos de maíz a cambios en la DP y determinar si existen relaciones entre las variables arquitecturales evaluadas con el RG, NG y PG.

## **Objetivos generales y específicos**

### **Objetivo general**

Caracterizar la arquitectura de las hojas, del tallo, así como los componentes numéricos del RG (NG y PG) de 6 híbridos de maíz.

### **Objetivos específicos**

- 1- Caracterizar la arquitectura de las hojas y del tallo de 6 híbridos comerciales de maíz.
- 2- Evaluar la importancia relativa de los componentes numéricos del RG.
- 3- Estudiar, a través de un índice de tolerancia (IT), la respuesta relativa de la arquitectura de la hoja, del tallo y del RG y sus componentes numéricos al incremento en la DP.
- 4- Generar un índice de tolerancia y rendimiento (ITR) para conocer el comportamiento de los genotipos (G) a través de un índice mixto que permita determinar aquellos híbridos de alta tolerancia y alto RG.
- 5- Correlacionar el IT de los rasgos arquitecturales evaluados con el ITR.

### **Hipótesis**

- i) Existen diferencias significativas en el tamaño, forma y orientación del tallo y hojas entre los 6 híbridos comerciales de maíz estudiados.
- ii) A medida que aumenta la densidad de siembra, la importancia relativa de los componentes numéricos del RG varía, y el PG adquiere una mayor relevancia en la definición del mismo.
- iii) El orden de mérito del IT de cada G para los rasgos arquitecturales evaluados, el RG y componentes numéricos, se mantiene constante a través de la DP.

- iv) La respuesta relativa del ITR para los G evaluados varía a través de las DP y se encuentra relacionada positiva y significativamente con el IT para el cociente entre la altura de la planta hasta la inserción de la espiga y la altura de planta hasta la última hoja (AE/AP)

## **Metodología**

### **Diseño experimental**

Se llevó a cabo un experimento durante la campaña agrícola 2021/2022 en el campo experimental de KWS Argentina (33°44'00.5"S 60°38'44.9"O), en la localidad de Manuel Ocampo, Buenos Aires. En el mismo seis híbridos comerciales de maíz (G1 a G6) fueron sembrados en tres DP contrastantes: 7.7, 9 y 13 pl m<sup>-2</sup> (D7.7, D9 y D13, respectivamente) siguiendo un diseño de parcelas divididas con 3 repeticiones. Se optó por una DP 7.7 dado que representa la densidad predominante en la zona productiva donde se realizó el ensayo. La elección DP 9 se justifica para realizar las evaluaciones en condiciones de alta productividad mientras que DP 13 se empleó con el propósito de inducir estrés lumínico y así explorar las modificaciones en la arquitectura de la planta.

Las DP fueron asignadas a las parcelas principales y los híbridos a las subparcelas. Cada subparcela estuvo compuesta por 4 hileras de 10 m de longitud distanciadas a 0.7 m.

El ensayo se sembró el 17 de Noviembre con una sembradora neumática, se fertilizó con 125 kg/ha de Urea y 135 kg/ha de Fosfato Diamónico Azufrado, y se

condujo libre de malezas, plagas y enfermedades por medio de controles químicos y mecánicos. Los datos de temperatura y precipitación fueron facilitados por la estación experimental agropecuaria INTA Pergamino.

### **Mediciones**

Todas las mediciones fueron expresadas como el promedio de 3 plantas medidas en cada subparcela salvo que se especifique otro tamaño muestral.

### **Caracteres morfológicos asociados con la estructura de la hoja**

Se determinó el número de hojas verdes totales (HVT) a R1, considerándolas como tal, cuando menos de la mitad de la superficie de las mismas presentó un color amarillento (Maddonni y Otegui, 1996), y se determinó el número de la hoja en la cual estaba inserta la espiga (HE).

En cada hoja se midió el ancho máximo (AH) y el largo máximo de las hojas verdes (LH). El área foliar (AF) individual fue calculada como  $AF = AH \times LH \times 0.75$  Ec. 1. (Montgomery, 1911). El AF de la planta entera (AFpl) fue calculada a través de la sumatoria del AF individual de las HVT medidas sobre cada planta. El ángulo de inserción foliar (AI) de las hojas fue medido respecto al plano horizontal y se determinó el largo al quiebre (LQ) de cada una de las hojas de la planta (i.e., largo desde la lígula hasta el punto donde el ángulo de la hoja se hace paralelo a la superficie del suelo), permitiendo estimar el valor de orientación de las hojas (VOH) aplicando la ecuación propuesta por Pepper et al., 1977:

$$VOH = 1/n \sum AI (LQH/LMH) \text{ Ec.2.}$$

Se calculó el VOH promedio por planta, promediando el valor individual de cada una de las hojas, así como el valor de orientación de las hojas del estrato inferior y superior de las plantas ( $VOH_i$  y  $VOH_s$ , respectivamente), tomando como referencia la HE para diferenciar los estratos. Una función bi-lineal describió la relación entre el AF y el número de hoja. El punto de quiebre de la función ( $X_0$ ) muestra la ubicación de la hoja de la espiga.

### **Caracteres morfológicos asociados con la estructura del tallo**

Se midió el diámetro menor y mayor la base del tallo para capturar su forma oval, en el primer nudo por encima de las raíces adventicias y se calculó el valor promedio del mismo (DT). Se midió la AP como la distancia desde la superficie del suelo hasta la inserción de la última hoja y la AE como la distancia desde la superficie del suelo hasta la inserción de la espiga principal. La relación AE/AP se calculó como el cociente entre AE y AP.

### **Rendimiento de grano y sus componentes numéricos**

El NG por planta y PG de 100 semillas se determinaron en madurez fisiológica. La totalidad de las espigas de las plantas evaluadas se cosecharon manualmente. Se registró el NG, PG, número de hileras y contenido de humedad de cada espiga. Con estos datos se estimó RG por planta corregido a 0% de humedad.

### **Análisis de datos**

Los efectos de la DP, genotipos (G) y su interacción sobre los rasgos medidos se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANVA) basado sobre las correspondientes fuentes de error de un diseño de subparcelas. Adicionalmente, las

relaciones entre variables se analizaron mediante el análisis de regresión y las diferentes funciones se ajustaron utilizando el software GraphPad Prism 6.0 para Windows.

Para analizar el grado de cambio de cada variable bajo estudio, se utilizó el índice de Tolerancia a la sequía de Fernández (1992) que se calculó utilizando la ecuación que se describe a continuación:

$$IT = (Y_p \times Y_s) / (Y_p.)^2 \text{ Ec. 3. Donde}$$

IT= índice de tolerancia a la sequía.

$Y_p$ = valor de la variable de un determinado G a baja DP.

$Y_s$ = valor de la variable del mismo G en alta DP.

$(Y_p.)^2$ = Cuadrado valor de la variable de todos los G en baja DP.

El objetivo del índice de tolerancia a la sequía es proporcionar una medida que evalúe cómo cada G responde al estrés bajo diferentes condiciones de densidad poblacional. Un valor mayor a 1 de IT indica una mayor estabilidad del G frente a elevadas DP. Esto significa que el valor de la variable del G en cuestión en ambientes de alta DP es proporcionalmente alto en comparación con el valor de la variable promedio de todos los G en condiciones de baja DP. Para el estudio, se consideró D7.7 como baja DP y las DP de D9 y D13 como alta DP.

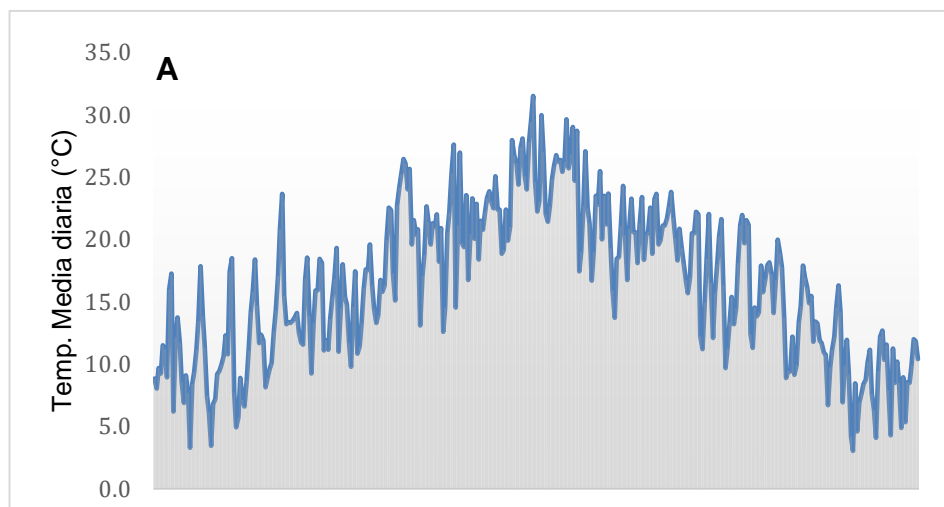
Mediante la multiplicación del rendimiento en términos absolutos de cada planta con el IT del RG, se determinó la variable índice de tolerancia y rendimiento (ITR) para conocer el comportamiento de los genotipos con una índice mixto que

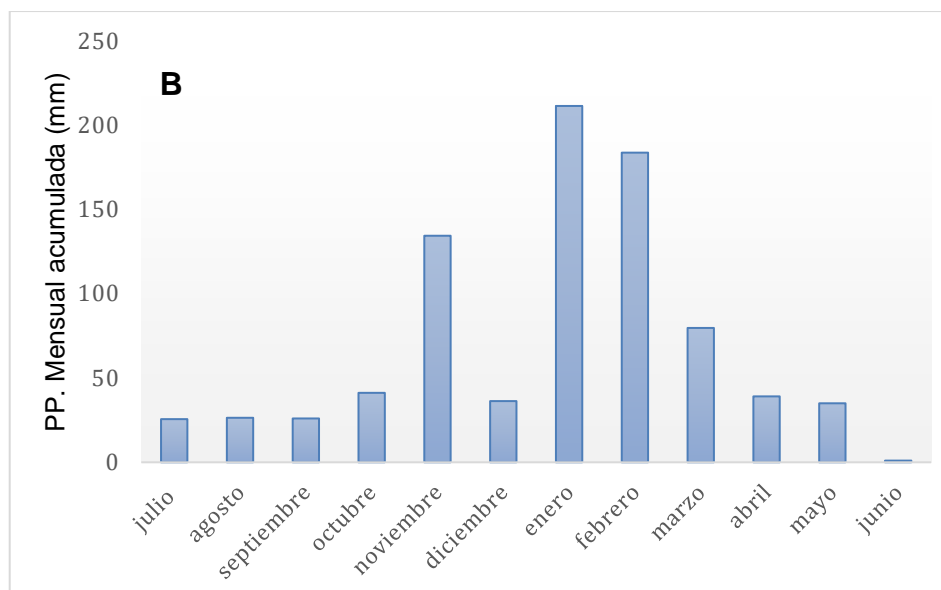
permita determinar aquellos genotipos de alta tolerancia y alto RG. A esta variable se la correlacionó con el IT para cada una de las variables evaluadas.

## Resultados

### Características Ambientales

Las figuras 1A y 1B muestran la evolución de la temperatura media diaria y la precipitación media mensual durante la campaña 2021/2022. El período crítico (PC) del cultivo [**15 de febrero**  $\pm$ 15 días] ocurrió con una temperatura media promedio de 20.3 °C y un registro de PP acumulado de 183,7 mm durante el mes de febrero, los valores de temperatura fueron muy similares al promedio histórico de la localidad para estas fechas, mientras que los registros de PP acumulada se encontraron por encima del valor promedio histórico para esa localidad en la mencionada fecha (22.05 °C y 106.31 mm, respectivamente).





**Figura 1.** Evolución de A) Temperatura media diaria y B) registro de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo de maíz en el campo experimental de KWS Argentina, en la localidad de Manuel Ocampo, Buenos Aires (Campaña 2021/2022).

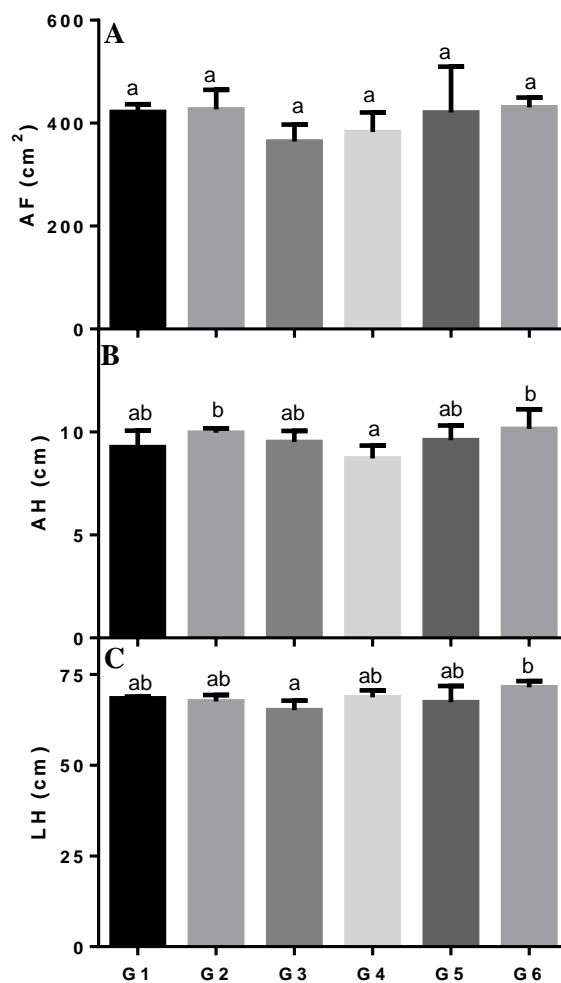
### **Caracterización morfológica de los híbridos de maíz**

La caracterización arquitectural se realizó con los datos obtenidos a D7.7.

#### **Arquitectura de la hoja**

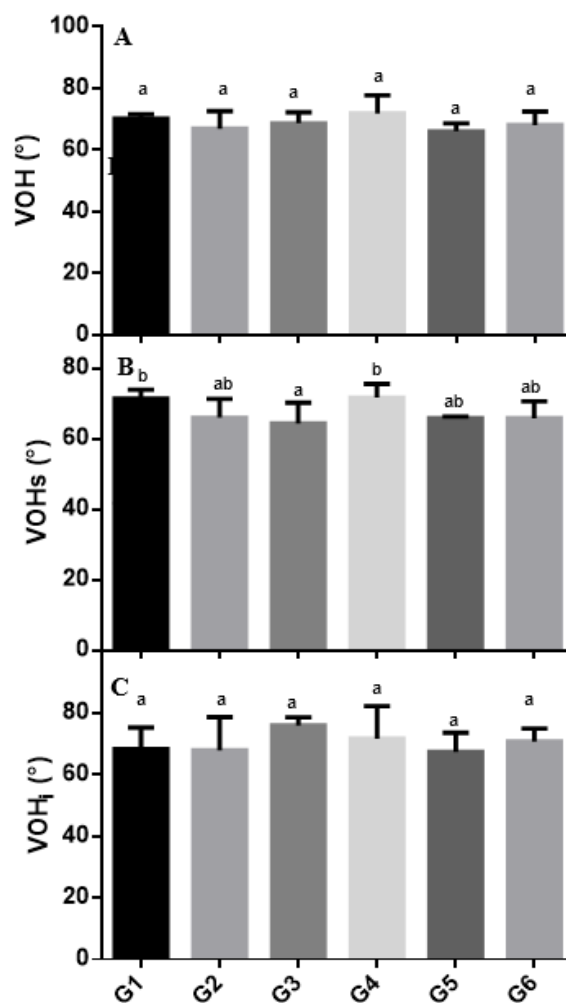
No existieron diferencias significativas entre los G para el AF. Se encontraron diferencias significativas entre los G para AH ( $p \leq 0.10$ ) y LH ( $p \leq 0.13$ ). El menor AF lo presentó el G3, asociado a un bajo LH. El mayor AF lo tuvo el G6, asociado a un elevado LH y AH. Además el G6 junto a G2 mostraron los mayores AH. Los G1, G2, G4 y G5 presentaron valores intermedios para los rasgos de AF y LH, sin mostrar diferencias significativas entre ellos ( $p < 0.05$ ), presentando el G4 el valor más bajo de AH (Figura 2).





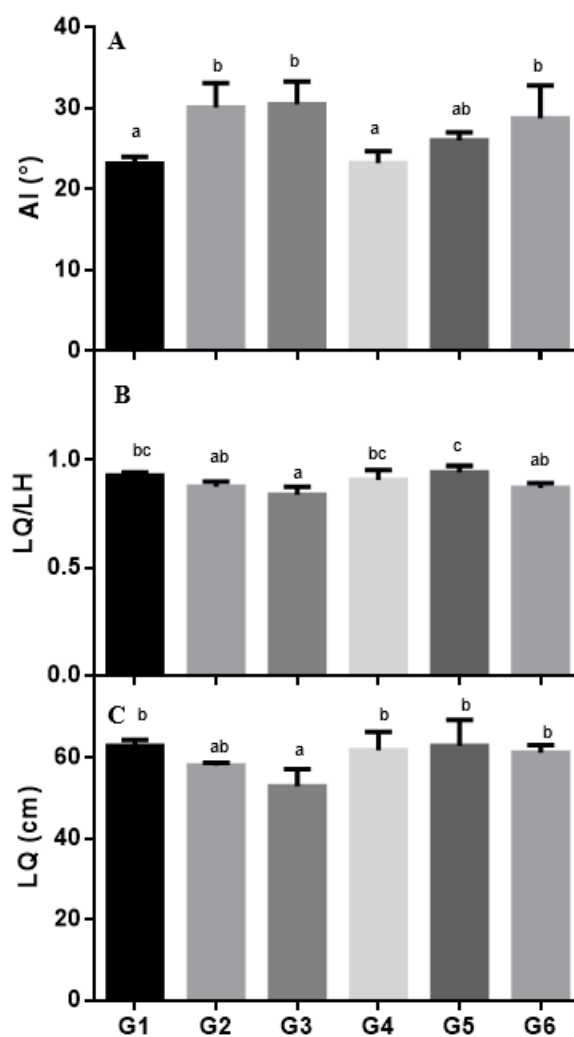
**Figura 2.** Valor promedio de A) Área foliar (AF; DMS: 64.7 cm), B) Ancho máximo de la hoja (AH; DMS: 1.03 cm) y C) Largo de la hoja (LH; DMS: 4.39 cm) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7. Medias con una letra en común indica que no existen diferencias significativas entre G.

No se encontraron diferencias significativas para el VOH promedio de la planta ( $p < 0.05$ ). El VOH segmentado por estratos (VOH<sub>i</sub>: estrato bajo la espiga y VOH<sub>s</sub>: estrato sobre la espiga), mostró diferencias significativas para el VOH<sub>s</sub> ( $p \leq 0.15$ ), para el cual G1 y G4 presentaron los mayores valores. No se encontraron diferencias significativas para el VOH<sub>i</sub>. (Figura 3).



**Figura 3.** Valor promedio de A) Valor de orientación de la hoja (VOH; DMS: 8.39°), B) Valor de orientación de las hojas del estrato superior de la planta (VOH<sub>s</sub>; DMS: 7.02°) y C) Valor de orientación de las hojas del estrato inferior de la planta (VOH<sub>i</sub>; DMS: °13.60) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7. Medias con una letra en común indica que no existen diferencias significativas entre G ( $p>0.15$ ).

Cuando se analizaron los componentes del VOH, se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los G para los rasgos de AI, LQ/LH y LQ. Los AI de hoja más erectófilas los presentaron G1 y G4, que no difirieron entre ellos para LQ/LH y LQ. Los AI más planófilos los presentaron G2, G3 y G6 mientras que G5 presentó valores intermedios (Figura 4).



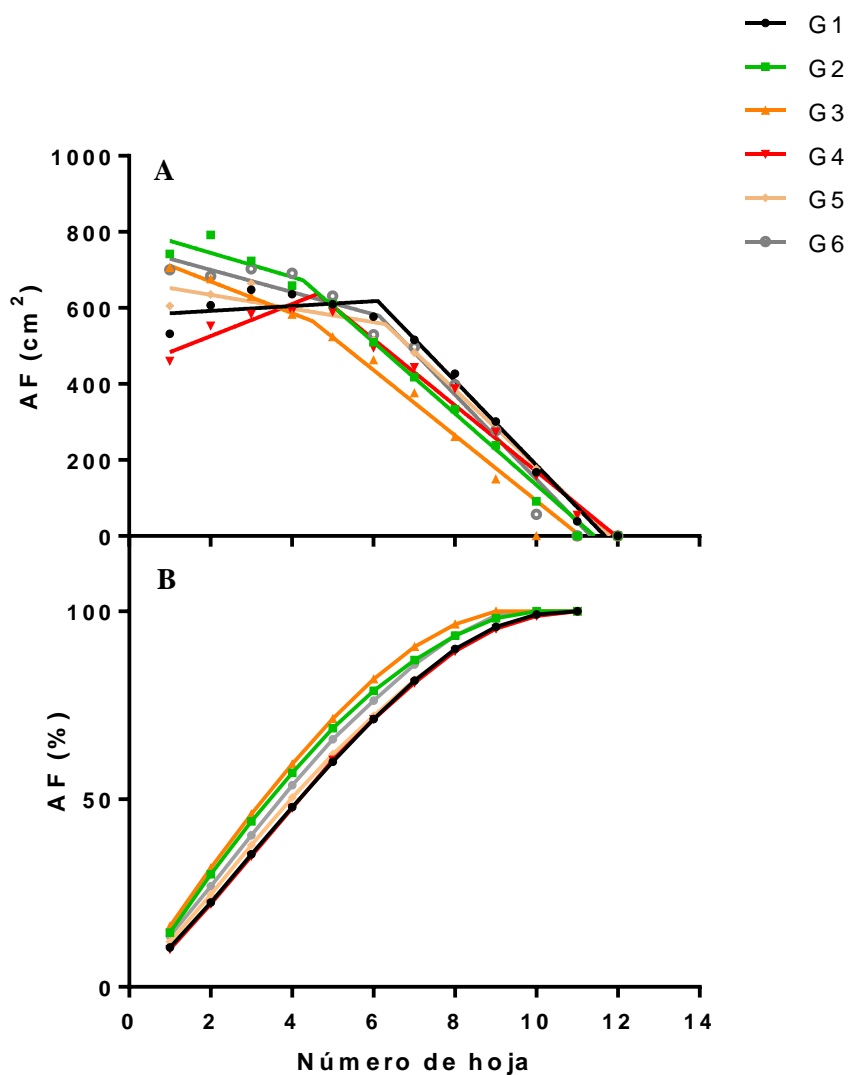
**Figura 4.** Valor promedio de A) Ángulo de inserción de la hoja (AI; DMS: 4.59°), B) Relación entre el largo de la hoja hasta el punto de quiebre y el largo máximo de la hoja (LQ/LH; DMS: 0.06) y C) LQ (DMS: 7.18 cm) de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en la D7.7. Medias con una letra en común indica que no existen diferencias significativas entre G ( $p>0.05$ ).

A excepción del G3, se ha detectado una tendencia en el incremento del AF desde las hojas de la base de la planta hacia las hojas más cercanas a la espiga, seguida por un decrecimiento hacia el ápice de la planta. Ahora bien, al analizar los G específicos, se observa que la pendiente de incremento del AF desde la base de la planta hasta el punto de quiebre fue positiva y similar entre los G1 y G4. Por otro lado, dicha pendiente fue negativa y similar entre los G2, G3, G5 y G6 (Figura 5a). Esta variación en las pendientes indica diferencias en la distribución del área foliar en función de los distintos G estudiados.

Los G1, G6 y G5 mostraron una mayor pérdida de pendiente del área foliar (AF) después del punto de quiebre (X0), lo que indica que el área foliar de cada hoja disminuyó más pronunciadamente en comparación con los otros G. Por otro lado, los G2, G3 y G4 exhibieron una menor disminución de la pendiente después de X0, lo que sugiere que el área foliar individual de cada hoja se mantuvo más estable (Figura 5A).

Se observaron variaciones en el porcentaje de área foliar acumulada según el G, los G2, G3, G5 y G6 acumularon más del 50% del AF en la hoja número 4, mientras que los G1 y G4 alcanzaron este porcentaje en la hoja número 5, por lo cual

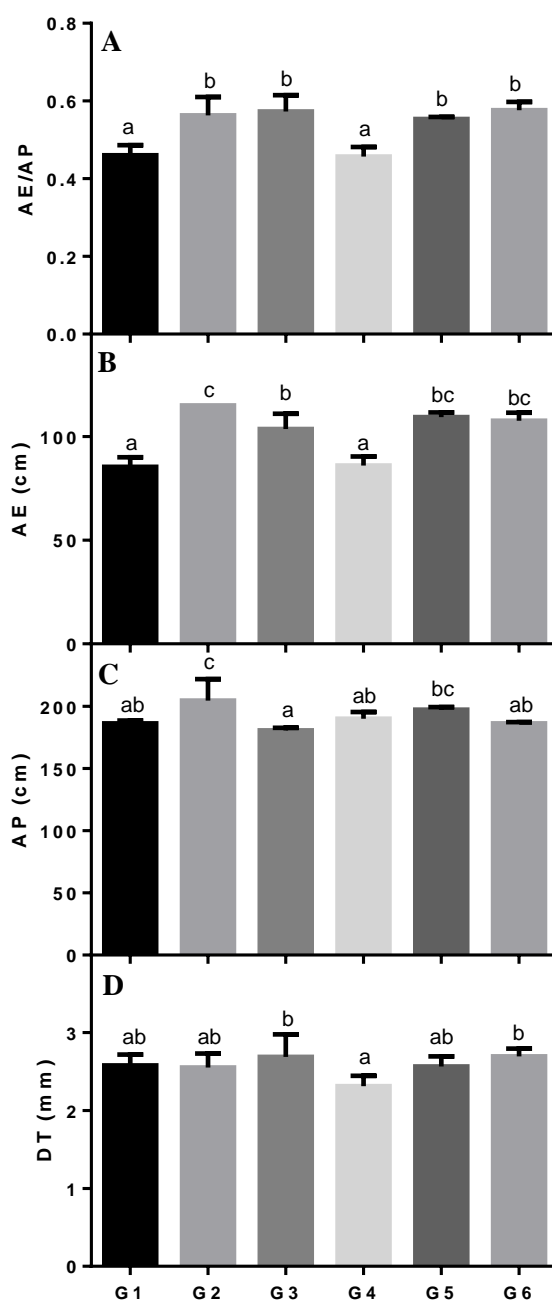
las hojas del ápice de la planta tuvieron, en términos porcentuales, una mayor relevancia en estos G, siendo la hoja número 4 el promedio de la hoja de la espiga (Figura 5B).



**Figura 5.** Variación de A) Área foliar (AF) y B) Porcentaje de área foliar acumulada (AF%) de cada una de las hojas de la planta de los 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6, indicados con líneas de colores) en la D7.7.

### **Arquitectura del tallo**

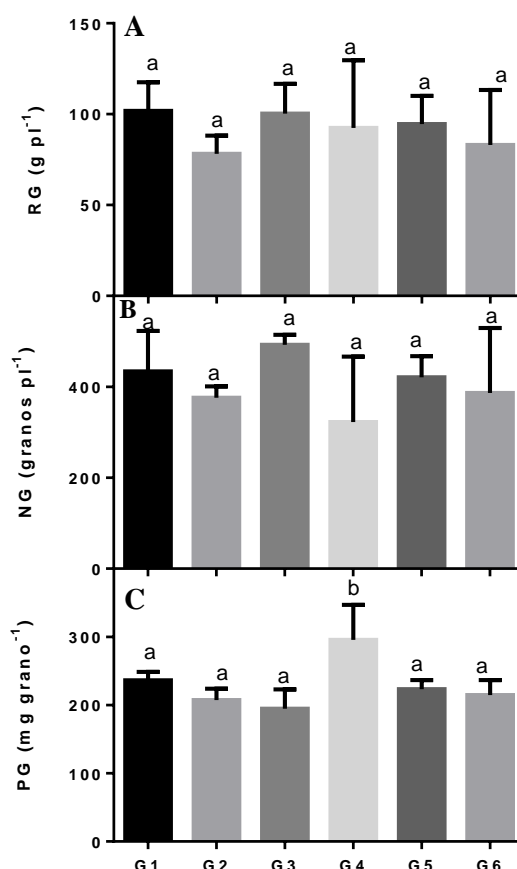
Existieron diferencias significativas entre los G para los rasgos de AE/AP; AP; AE ( $p < 0.05$ ) y DT ( $p \leq 0.15$ ). Para ninguna de las variables mencionadas hubo diferencias significativas entre el G1 y el G4, los cuales presentaron la menor relación AE/AP, AE y DT. Los G2, G3, G5 y G6 no tuvieron diferencias en la relación AE/AP. El G2 presentó los mayores valores de AP y AE mientras que el G3 la menor AP y junto con G6 el mayor DT. Los G5 y G6 presentaron valores intermedios y similares para AE y AP (Figura 6).



**Figura 6.** Valor promedio de A) Relación entre la altura a la inserción de espiga (AE) y la altura total de la planta (AP) (AE/AP); Diferencia mínima significativa (DMS):0.06), B) AE (DMS: 8.29 cm), C) AP (DMS: 14.15 cm) y D) Diámetro del tallo (DT; DMS: 0.3mm) de 6 híbridos comerciales de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) cultivados en D7.7. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre G ( $p > 0.05$ ).

### Rendimiento de grano y sus componentes numéricos

No se encontraron diferencias significativas entre los diferentes G para RG y NG, sin embargo, se encontraron diferencias significativas para el componente PG ( $p < 0.05$ ). El G3 presentó el mayor valor de NG, seguido por G1, G2, G5 y G6, mientras que el G4 mostró el menor valor para esta variable. Por otro lado, para la variable PG, se encontraron diferencias significativas en donde el G4 presentó el mayor valor, superando a todos los demás G, los cuales no presentaron diferencias significativas entre ellos (Figura 7).



**Figura 7.** Valor promedio de A) Rendimiento de grano (RG; DMS: 34.04 g), B) Número de granos (NG; DMS: 161.51 granos) y C) Peso de grano (PG; DMS: 43.25 mg) de 6 híbridos de



maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) en D7.7. Medias con una letra en común indica que no existen diferencias significativas entre G ( $p>0.05$ ).

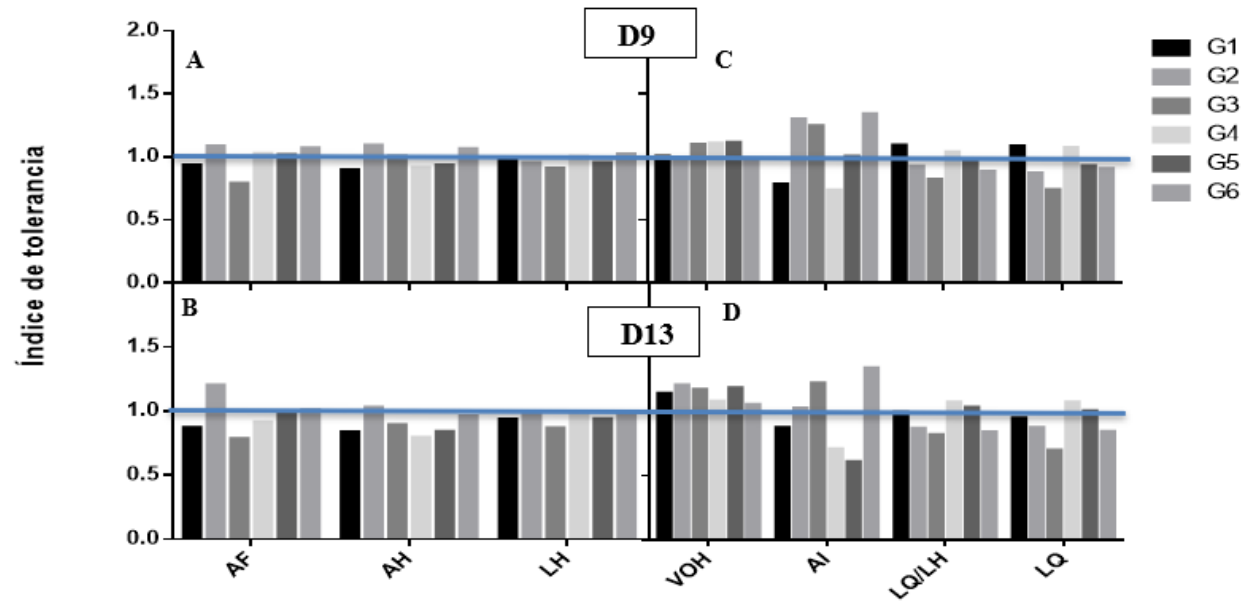
Aunque no se encontraron diferencias significativas entre los G para el RG, se observó que G1 y G3 fueron los que alcanzaron los mayores valores de RG, y ambos se relacionaron con un elevado NG. Por otro lado, el G4 presentó el mayor PG y valores intermedios en cuanto a RG. G2 exhibió el menor RG, lo cual estuvo condicionado por bajos valores tanto en NG como en PG. Finalmente, G5 y G6 mostraron valores intermedios en RG, NG y PG.

### **Índice de tolerancia al estrés**

#### **Arquitectura de hoja**

Para AF, G2, G4, G5 y G6 mostraron IT por encima de 1 en D9, mientras que solo el G2 y G6 mantuvieron el IT por encima de 1 en D13. Tanto G2, G3 como G6 exhibieron IT superiores a 1 para el rasgo de AH en D9, mientras que solo el G2 lo presentó en D13. En cuanto a LH, G4 y G6 mostraron valores levemente superiores a 1 en D9 (Figuras 8 A y B).

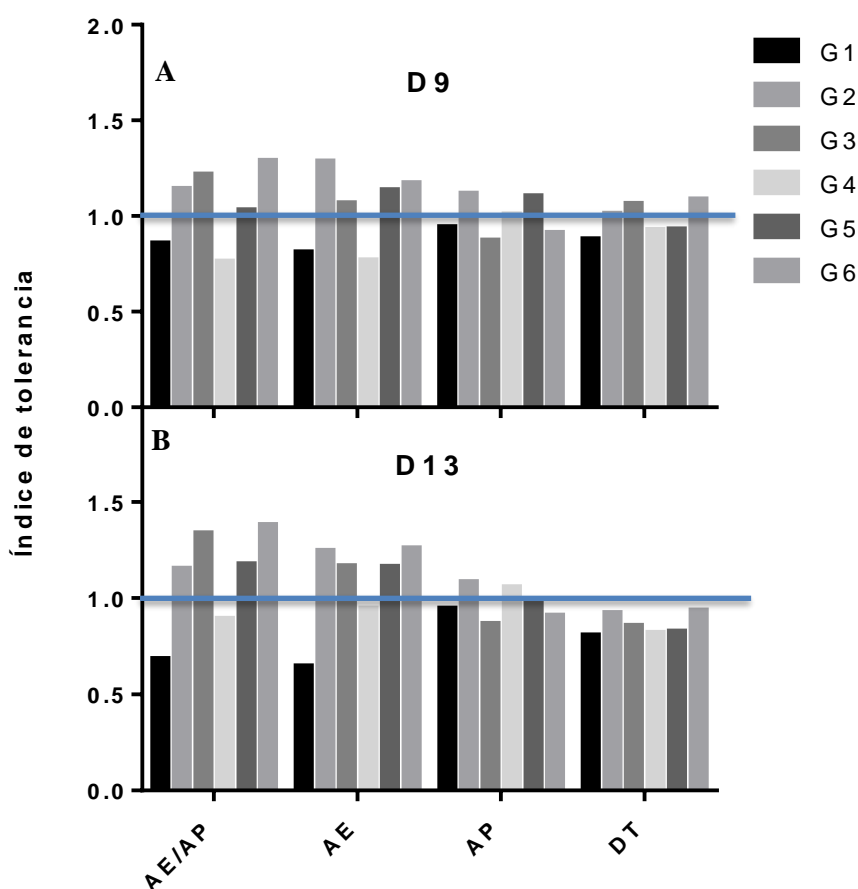
El VOH fue una variable que presentó elevados IT para todos los G en ambas DP. Por otro lado, para el AI los G2, G3, G5 Y G6 presentaron  $IT>1$  en D9 y los G2, G3 y G6 en D13. En relación a la variable LQ/LH y LQ, únicamente los G1 y G4 mostraron  $IT>1$  en D9, mientras que los G4 y G5 mantuvo el  $IT>1$  al ser evaluado en D13 (Figura 8 C y D).



**Figura 8.** Valor del índice de tolerancia del Área foliar (AF), Ancho máximo de la hoja (AH) y Largo de la hoja (LH) en A) D9 y B) D13. Variación del índice de tolerancia del Valor de orientación de la hoja (VOH), Ángulo de inserción de la hoja (AI), Relación entre el largo de la hoja hasta el punto de quiebre (LQ) y el largo máximo de la hoja (LH) y LQ en C) D9 y D) D13, de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) indicados con barras de colores.

### **Arquitectura de tallo**

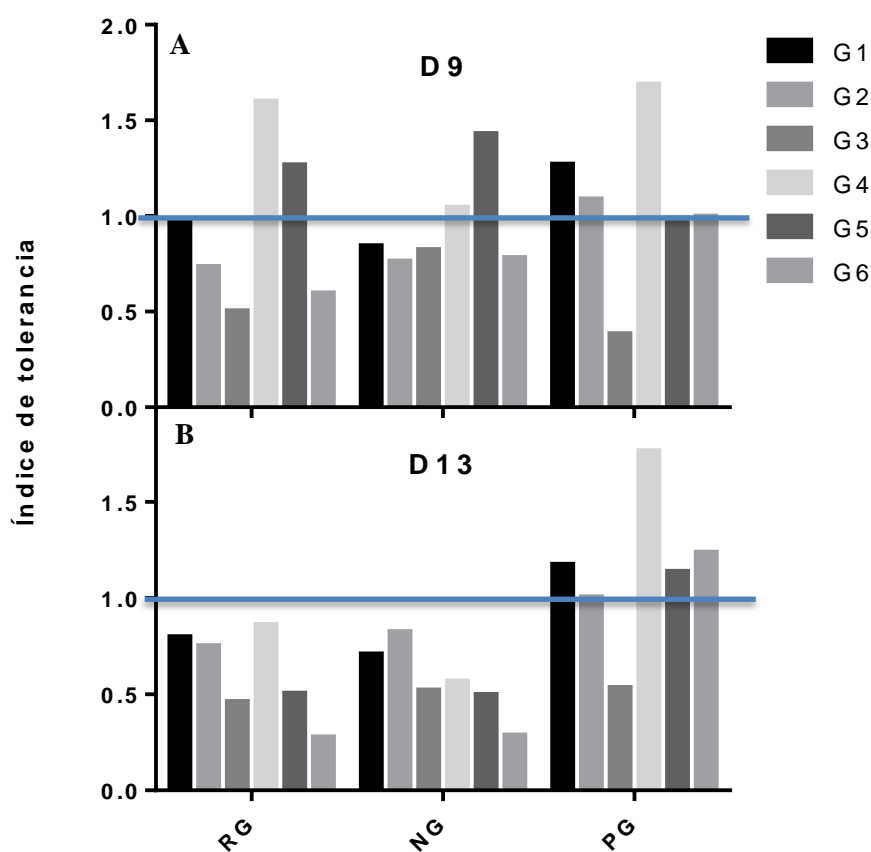
En general, el IT para los rasgos arquitecturales del tallo de los G evaluados se mantuvo constante a través de las diferentes DP. Los G2, G3, G5 y G6 presentaron IT por encima de 1 para la relación AE/AP y para el rasgo de AE, tanto en D9 como en D13. Sin embargo, para el rasgo de AP, los índices fueron mayores para el G2, G4 y G5 en D9, y para el G2 y G4 en D13. Además, el rasgo de DT mostró IT superiores a 1 para los G2, G3 y G6 solo en D9, mientras que en D13 no se observaron valores mayores de 1 (Figura 9).



**Figura 9.** Variación del índice de tolerancia de la relación entre el cociente de la altura a la inserción de espiga (AE) y la altura total de la planta (AP) (AE/AP), AE, AP y Diámetro del tallo (DT) en A) D9 y B) D13, de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) indicados con barras de colores.

### RG y componentes numéricos

El índice de tolerancia para el RG y NG solo fue mayor a 1 en D9 para G4 y G5, ambos componentes se vieron fuertemente afectados en D13 y ningún G mantuvo el  $IT > 1$  bajo esta condición. Para el rasgo de PG, se observó una mayor estabilidad en el IT al ser evaluados tanto en D9 como D13, ya que todos los G a excepción del G3 presentaron  $IT > 1$  en ambas D (Figura 10).



**Figura 10.** Variación del índice de tolerancia del Rendimiento de grano (RG), Número de granos (NG) y Peso de grano (PG) en A) D9 y B) D13, de 6 híbridos de maíz (G1, G2, G3, G4, G5 y G6) indicados con barras de colores.

### Índice de tolerancia y rendimiento (ITR)

La multiplicación del RG en términos absolutos con el ITRG determinó la variable índice de tolerancia y rendimiento (ITR), para ambas D evaluadas. En D9, G4 y G5 presentaron los mayores ITR, mientras que en D13, G4 y G2 presentaron los máximos valores de ITR (Tabla 1). Para ambas DP, G6 obtuvo el menor ITR.

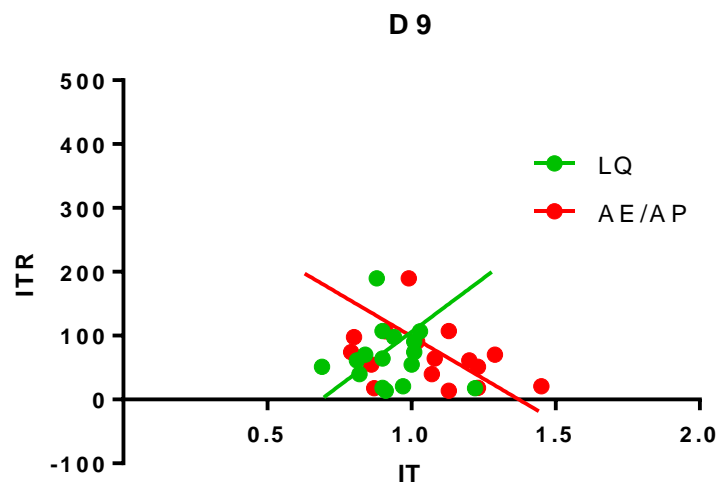
**Tabla I.** Orden de mérito del índice de tolerancia y rendimiento (ITR) de los seis genotipos (G) evaluados ante ambientes de media densidad de plantas (D7-D9) y alta densidad de plantas (D7-D13)

	<b>ITR</b>	<b>ITR</b>	
	<b>D7-D9</b>	<b>D7-D13</b>	
<b>G4</b>	137.54 a	51.27 a	<b>G4</b>
<b>G5</b>	99.98 a	40.11 ab	<b>G2</b>
<b>G3</b>	54.74 b	27.95 bc	<b>G1</b>
<b>G1</b>	53.73 b	23.00 c	<b>G3</b>
<b>G2</b>	49.68 b	20.42 cd	<b>G5</b>
<b>G6</b>	29.88 b	5.68 d	<b>G6</b>
<b>Media</b>	<b>70.93</b>	<b>28.07</b>	
	(39.34)	(15.77)	

Dentro de cada columna, medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ). Los valores de diferencias mínimas significativas (DMS) se especifican entre paréntesis.

La correlación entre el ITR con los IT de los rasgos de arquitectura de hoja y tallo mostró que se encontraron relaciones significativas y positivas entre el ITR con ITLQ y relaciones significativas y negativas con IT AE/AP ( $p < 0.05$ ) en D9 (Figura 11).

El IT de la relación AE/AP explicó en un 33% las variaciones en el ITR mientras que el IT LQ lo hizo en un 24%, a través de una función lineal en D9.



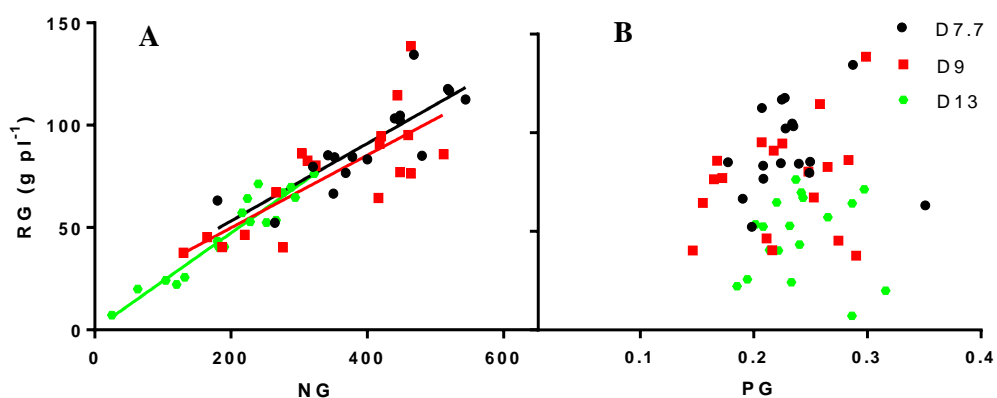
LQ	AE/AP
$Y = 336.8 \cdot X - 230.9$	$Y = -265.4 \cdot X + 364.3$
*	*
$R^2: 0.2478$	$R^2: 0.3355$

Los niveles de significancia de cada tratamiento son indicados por símbolos:

\*  $p < 0.05$ .

**Figura 11.** Relación entre el índice de tolerancia y rendimiento (ITR) con A) el índice de tolerancia del largo al quiebre de la hoja (ITLQ; círculos llenos verdes) y B) índice de tolerancia para la relación entre la altura a la inserción de la espiga y la altura de la planta a última hoja (ITAE/AP; círculos llenos rojo) en D9. Cada punto representa a cada uno de los G evaluados.

El NG explicó hasta un 90 % las variaciones en el RG a través de una función lineal para todas las DP (Figura 12 A), mientras que cambios en PG no presentaron una relación significativa con el RG para las DP analizadas ( $p > 0.05$ ; Figura 12 B).



NG		
D7.7	D9	D13
$Y = 0.1895 \cdot X + 15.31$	$Y = 0.1774 \cdot X + 14.39$	$Y = 0.2352 \cdot X + 0.3042$
*	*	*
$R^2: 0.7040$	$R^2: 0.5959$	$R^2: 0.9073$
PG		
D7.7	D9	D13
$Y = 44.58 \cdot X + 81.01$	$Y = 142.3 \cdot X + 43.75$	$Y = 21.77 \cdot X + 42.14$
ns	ns	ns
$R^2: 0.0066$	$R^2: 0.0657$	$R^2: 0.0015$

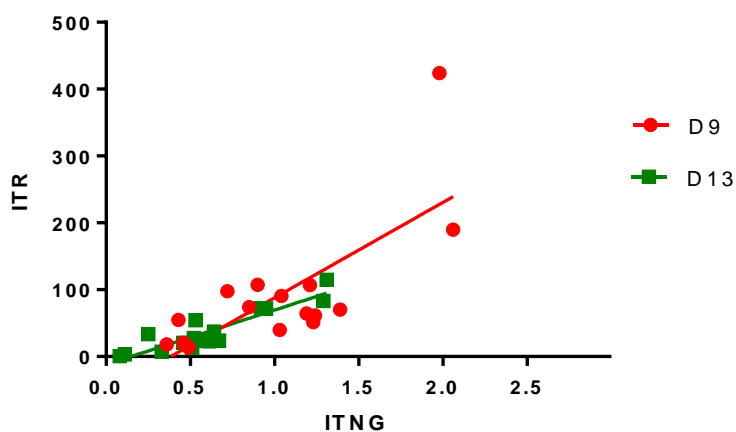
Los niveles de significancia de cada tratamiento son indicados por símbolos: \*  $p < 0.05$ ; ns: no significativo.



**Figura 12.** Relación entre el Rendimiento de grano (RG) con A) Número de granos por planta (NG) y B) Peso de grano por planta (PG). Los colores representan cada DP, D7.7, D9 y D13. Cada punto representa a los híbridos en cada DP.

Se encontraron regresiones lineales positivas y significativas entre el ITR y el ITNG ( $p < 0.05$ ) en donde el ITNG explicó hasta en un 81% las variaciones en el ITR

(Figura 13)



D9	D13
$Y = 142.7 \cdot X - 54.75$	$Y = 81.56 \cdot X - 12.02$
*	*
$R^2: 0.5557$	$R^2: 0.8150$

Los niveles de significancia de cada tratamiento son indicados por símbolos: \*  $p < 0.05$

**Figura 13.** Relación entre el índice de tolerancia y rendimiento (ITR) con el índice de tolerancia al número de granos (ITNG). D9 y D13 están representadas con líneas de colores (rojo y verde, respectivamente). Cada punto representa a los genotipos en cada DP.

## Discusión

En el cultivo de maíz la determinación del RG se reduce a cómo crecen las plantas alrededor de R1. Por lo tanto, eventos que generen una elevada competencia intra-específica, como por ejemplo el incremento en la DP, y consecuentemente una disminución de los recursos disponibles por planta durante este período, provocarán caídas fuertes en el RGP a través de una menor fijación de granos (i.e., menor NGP o un menor PG). Adicionalmente, incrementos en DP generan cambios en el ambiente lumínico disminuyendo el flujo de la relación rojo/rojo lejano y desencadenando respuestas foto-morfogénicas que alteran la estructura de la planta. Este trabajo permitió estudiar la arquitectura de la hoja y tallo de 6 híbridos de maíz argentinos y el comportamiento general del RG. Se determinó la tolerancia a la DP de cada uno de los rasgos arquitecturales evaluados, así como el RG y sus componentes numéricos. Se desarrolló un índice que determinó aquellos G de alta tolerancia y rendimiento y se encontraron relaciones significativas entre esta variable y el índice de tolerancia a ciertos rasgos arquitecturales.

El tamaño, forma y orientación del tallo y las hojas, define la arquitectura de las plantas de un canopeo y consecuentemente determina la intercepción de luz por el cultivo y la penetración de la misma en los diferentes estratos del canopeo (Maddonni et al., 2001b). El fenotipo ideal para alta DP, debería presentar una estructura de planta que maximice la captura de radiación a nivel de cultivo, pero que atenúe la interferencia entre las plantas de manera de mitigar la reducción en la TCP<sub>pc</sub> y consecuentemente del NGP (Ku et al., 2015). Retrospectivamente, el mejoramiento generó cambios hacia estructuras de plantas más compactas que permitieron un mejor desempeño del cultivo en AD (Russell, 1985; Russell, 1991; Duvick, 1997; Duvick y

Cassman, 1999; Tollenaar y Wu, 1999; Troyer, 2000; Sangoi et al., 2002; Duvick, 2005a; Chen et al., 2017; Incognito, 2019, Elli et al., 2023). En el presente trabajo, se encontraron diferencias entre los G evaluados en cuanto a los siguientes rasgos arquitecturales: AH, LH, VOHs , AI, LQ/LH, LQ, AE/AP, AE, AP y DT, motivo por el cual no se rechaza la primera hipótesis que plantea que i) existen diferencias significativas en la arquitectura de las hojas y del tallo entre los 6 híbridos comerciales de maíz estudiados. Estas diferencias permitieron reunir a los G en los siguientes grupos:

Grupo 1 G1 y G4: Estos G se caracterizan por ser plantas de valores intermedios de AF pero erectófilos, con los mayores VOHs, y los menor AI. De menor AF en hojas iniciales, y con más preponderancia de AF en hojas superiores a la espiga. Plantas bajas, de menor AE, AE/AP y DT. De muy buen RG, el G1 condicionado por un elevado NG y el G4 por un alto PG. Posiblemente, una menor AP y hojas más erectófilas hayan aumentado la captura de luz solar, mejorado la eficiencia en el uso de recursos y minimizado la competencia entre plantas, lo que resultó en un elevado RG en estos G.

Grupo 2 G3: Este G se caracterizan por tener baja AF, condicionado por bajos valores en el LH. Bajos valores de VOHs. G planófilo, con elevado AI. Gran valor de AF en hojas iniciales. De mayor relación AE/AP, intermedio valor de AE, presentando el menor valor de AP y gran DT. De muy buen RG asociado a presentar el mayor NG.

Grupo 3 G2, G5 y G6: Estos G se caracterizan por tener intermedios/elevados valores de AF, condicionado por elevados AH y LH. Valores intermedios en el VOHs. G planófilos, con amplios valores de AI. Gran valor de AF en hojas iniciales.

De mayor relación AE/AP, AE e intermedio (G2 y G5) y gran (G6) DT. De valores intermedios y sin DS para RG, NG y PG entre ellos.

Este agrupamiento podría dividir a los G evaluados en aquellos mayormente destinados a la producción de grano donde se pretende una estructura de planta más erectófila que permita aumentar la DP sin generar una elevada competencia intra-específica. Como ejemplo de estos G podemos destacar a G1 y G4, aunque G5 podría formar parte de este grupo. Por el otro lado, cuando se busca G adaptados al ensilaje, una estructura de planta compacta no constituye un objetivo a perseguir y en este sentido, los híbridos G2, G3 y G6, parecerían los más adecuados por mostrar plantas de mayor AF y más planófilas que podrían aportar un mayor rendimiento de materia seca digestible de la planta completa.

Los G evaluados presentaron similar RG, sin embargo presentaron diferentes estrategias en cuanto a NG y PG para generar al mismo. Se encontraron diferencias significativas en el PG en D7.7, siendo el NG el único componente que se asoció positiva y significativamente con el RG en las tres DP evaluadas. Los G erectófilos (G1) como planófilos (G3) presentaron elevados NG, lo que se tradujo en un aumento del RG. Esto indica que, en condiciones de baja DP (D77), tanto G de arquitectura erectófilos como planófilos, tienen un elevado potencial de RG. Similares resultados fueron encontrados por Huang et al. (2017) que al evaluar 3 G de maíz de diferente arquitectura de planta, no encontró diferencias significativas en el RG a bajas DP (60.000 plantas/ha). Sin embargo, en altas DP (D9 y D13) los mayores RG los presentó el G más erectófilo (G4). Posiblemente, este comportamiento podría estar asociado a su mayor capacidad de producción de granos debida a una mayor penetración de luz (no medido) al nivel de la espiga por su elevado VOHs, acompañado de una estructura de planta más compacta por una baja AP, menor AE,

relación AE/AP . A diferencia de lo encontrado por Sangoi et al. (2002), cuya investigación sugiere que la estatura menor de la planta y una mayor AE pueden ser rasgos importantes para la adaptación exitosa de los híbridos brasileros de maíz a altas DP. Sin embargo, es importante destacar que algunos híbridos de carácter planófilo (G5 y G2) exhibieron buenos valores de RG, NG y PG inclusive en ambientes de alta DP (D9 y D13, respectivamente) lo que indica que pueden ser una opción viable en ciertos escenarios de producción. En coincidencia con lo encontrado por Salve et al. 2023 el aumento de la DP redujo el RG por planta pero mejoro el rendimiento por unidad de superficie. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar el tipo de híbrido adecuado según los objetivos de producción y las condiciones del cultivo. Por lo mencionado, se rechaza la segunda hipótesis que ii) para la definición del RG, la importancia relativa de los componentes numéricos del mismo, varía al aumentar la densidad.

El presente trabajo utilizó el IT de Fernández (1992) como una herramienta para evaluar cómo los G de maíz responden a condiciones de AP. Los resultados mostraron que algunos G tienen una mayor capacidad de adaptación a ambientes de AP, lo que se tradujo en un IT por encima de 1. En líneas generales se observó una tendencia del G2 y G6 hacia una mayor tolerancia al estrés en varias características relacionadas con la arquitectura de hojas. Por otro lado, G1, G4 y G5 mostraron cierta tolerancia, pero en menor medida en comparación con G2 y G6. El IT más estable a través de las DP fue el VOH, lo que constituye un resultados esperado debido a que es un rasgo que se encuentra bajo un fuerte control genético como lo mostraron los resultados de Incognito et al. (2020), Chang et al. (2016), Chen et al. (2015). Contrariamente, LH, fue el rasgo más afectado ante aumentos en la DP; resultado que no coincide con los hallazgos de Sonohat and Bonhomme (1998), quienes

determinaron que el AH fue el rasgo principal que reguló el AF ante el incremento en DP.

Por otro lado, el IT para los rasgos arquitecturales del tallo se mantuvo más estable ante aumentos en la DP, G2, G3, G4 y G5 presentaron elevados IT. En el caso de AP, se muestra mayor respuesta para D9 que para D13, posiblemente porque en D13 ya se podría estar ante un escenario de una fuerte competencia por recursos (i.e., menor crecimiento). Los G 2, 4, 5, 6 han disminuido la AP al ser evaluados en D13, resultados similares fueron obtenidos por Liu et al 2022. Los valores de AE/AP, y AE fueron los más estables, y el DT resultó el rasgo de menor tolerancia frente a aumentos en la DP, Budakli et al. (2010) evaluaron 5 DP (60, 100, 140, 180 y 220 pl/m<sup>2</sup>) y encontraron que la AP no varió al aumentar la DP, mientras que el DT se vio fuertemente afectado. En términos generales, estas reacciones foto-morfogénicas, descritas en el denominado síndrome de evasión al sombreado, responden a los cambios en la calidad de la luz, la cual al transmitirse a través de la vegetación se agota en rojo (R) y se enriquece fuertemente en rojo lejano (RL). El flujo de baja relación R/RL que reciben las plantas incluso antes de alcanzarse el sombreado directo, actúa como una señal temprana de proximidad de plantas vecinas (Casal et al., 1986; Ballaré et al., 1990). Estos cambios percibidos por el fitocromo B (Kebrom y Brutnell, 2007), aumentan la dominancia apical (Smith y Whitelam, 1997) y promueven la elongación y el afinamiento de los tallos y las hojas (Ballaré et al., 1990) y explicarían parcialmente los resultados hallados en este trabajo. En líneas generales, para los componentes numéricos del RG, el PG se vio afectado en menor medida que el NG acorde a lo hallado por Incognito (2019) evaluando híbridos de maíz liberados en diferentes décadas. El G4 presentó los RG más estables condicionados por una alta tolerancia del PG en alta DP.

Los resultados indicaron que, bajo condiciones de alta DP, existen G más tolerantes a la competencia por recursos que pueden mantener el RG más estable. Sin embargo, el orden de mérito del IT de los G solo se mantuvo constante a través de las DP evaluadas para los rasgos de AF y AH, por lo cual se rechaza la tercera hipótesis que iii) el orden de mérito del IT de cada G para los rasgos arquitecturales evaluados, el RG y componentes numéricos, se mantiene constante a través de la DP.

Al evaluar el ITR se encontró que los únicos G que no variaron su orden de mérito ante las diferentes DP fueron el G4 ocupando el primer lugar y el G6, ocupando el último. Comparativamente y para ambas DP, el G4 presentó mayor IT para VOH, LQ/LH, LQ, AP, NG, PG, mientras que G6 para el AF, AH, LH, AI, AE/AP, AE, DT. Adicionalmente, se encontraron relaciones significativas entre el ITR con el IT LQ y el IT AE/AP. Esto sugiere que la tolerancia a ciertos rasgos arquitecturales pueden estar relacionados con un mayores RG y en ambientes de alta DP. Específicamente, un menor IT de la relación AE/AP y mayor IT LQ se correlacionó con mayor RG en D9 . Estos hallazgos indican que la arquitectura de los híbridos de maíz, como sus índices de tolerancia para los rasgos arquitecturales, puede ser un factor importante a considerar al seleccionar G para ambientes de alta DP, ya que ciertos rasgos arquitecturales pueden conferir una ventaja competitiva en estas condiciones. De este modo, no se rechaza la hipótesis 4, iv) La respuesta relativa del ITR para los G evaluados varía a través de las DP y se encuentra relacionada positiva y significativamente con el IT para el cociente entre la altura de la planta hasta la inserción de la espiga y la altura de planta hasta la última hoja (AE/AP) ya que la respuesta relativa del ITR para los G evaluados varió a través de la DP y se encontró asociado positiva y significativamente con el IT AE/AP. Al momento de seleccionar G que se adapten a altas DP, no es necesario pensar en elegir genotipos que no

presenten cambios morfológicos debido a que, como se mencionó previamente, estos cambios constituyen respuestas foto-morfogénicas a cambios en el ambiente lumínico. Especialmente en el caso del maíz cultivado en alta DP HD, Wies y Maddonni (2020) evaluaron si los cambios de los rasgos de la arquitectura de la planta generados para evitar el sombreado desencadenados por altas DP (i.e., tallos más finos, elongación de la planta, área foliar y anatomía foliar), son perjudiciales o beneficiosos para el crecimiento de las plantas y RG. Ellos descubrieron que evitar la sombra no tiene ningún efecto perjudicial sobre el RG debido a que la TCPpc y el NGP fueron sostenidos por las diferentes capacidades de las plantas para captar la luz (i.e., alta respuesta de los rasgos de la arquitectura de las plantas). Por esta razón, se podrían seleccionar G como el G4, que muestran una alta respuesta a la DP para los rasgos arquitecturales pero sostienen un alto RG.

El empleo de modelos de simulación permitiría pronosticar el rendimiento agronómico del maíz en diversos escenarios, optimizar las prácticas de manejo del cultivo para maximizar dicho rendimiento, analizar detalladamente cómo las plantas de maíz responden a factores de estrés tanto abióticos (como sequías o temperaturas extremas) como bióticos (como enfermedades o plagas), y explorar las interacciones entre los genotipos de maíz y su entorno. Este enfoque no solo proporciona información valiosa para la toma de decisiones en la agricultura, sino que también reduce los costos y el tiempo asociados con los experimentos de campo tradicionales, al permitir simular una amplia gama de condiciones y escenarios de manera eficiente y precisa en un entorno virtual.

El estudio de la arquitectura de diferentes G de maíz argentinos proporcionó información valiosa sobre la variabilidad genética y la adaptabilidad de estos G a diferentes condiciones de manejo. Los resultados resaltan la importancia de



seleccionar G con características arquitecturales adecuadas para maximizar el RG en diferentes DP. El uso del IT como una herramienta de evaluación de la tolerancia a la densidad proporciona una forma objetiva de seleccionar G adecuados para ambientes con alta DP. Además, se destaca la relevancia de ciertos rasgos arquitecturales, como la relación entre AE/AP, así como el LQ, en la relación con el ITR. Estos hallazgos pueden tener implicancias importantes para el mejoramiento genético y la selección de G de maíz con mayor potencial de RG en diferentes condiciones de manejo. Aunque el año reveló diferencias significativas, es necesario llevar a cabo más ensayos en diversas localidades y densidades de plantas para confirmar la repetibilidad de estos resultados. Se espera que en años de escasez hídrica, uno de los componentes importantes de la arquitectura de la planta, como el ancho de la hoja, se vea afectado debido a los cambios en la tasa de división celular.

En última instancia, esta investigación contribuye al conocimiento científico y a la toma de decisiones en el sector agrícola, lo que puede ayudar a aumentar la producción de maíz y satisfacer la creciente demanda global de este cultivo.

## Conclusiones

Los diferentes G de maíz mostraron respuestas arquitecturales diversas ante cambios en la DP, existiendo adaptaciones genotípicas diferentes según las condiciones ambientales. En bajas DP tanto G planófilos como erectófilos tienen elevado potencial de RG. Algunas características arquitecturales, como la AE/AP y LQ son indicadores clave de adaptación y rendimiento a elevada DP, siendo en estas situaciones G más compactos los de mejor performance. Estos rasgos podrían ser utilizados en programas de mejoramiento para seleccionar G tolerantes a la alta DP dentro de un sistema de fenotipado rápido a campo.

El IT constituyó una herramienta clave para determinar aquellos G con mayor adaptación a ambientes de AP, observándose una tendencia del G2 y G6 hacia una mayor tolerancia al estrés en varias características asociadas a la arquitectura de hoja y del tallo. Mientras que elevados ITR, indicaron G que tuvieron una capacidad superior para mantener RG elevado incluso bajo condiciones de alta DP, lo que sugiere una mayor adaptabilidad y resistencia al estrés de estos G. Esta mayor estabilidad del RG en ambientes de alta DP puede ser un atributo deseable para la selección de genotipos en programas de mejora genética o en cultivos sujetos a condiciones de alta competencia por recursos como agua, luz y nutrientes.

## Bibliografía

- Andrade, F., Uhart, S.A., Frugone, M.I., 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade versus plant density effects. *Crop Science* 33, 482-485.
- Andrade, F. 1994. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina.
- Andrade, F., Vega, C., Uhart, S. et al., 1999b. Kernel number determination in maize. *Crop Science* 39, 453-459.
- Andrade, F.H., Otegui, M.E., Vega, C.R.C., 2000. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. *Agronomy Journal* 92, 92-97.
- Andrade, F., 2016. Los desafíos de la agricultura. IPNI, Buenos Aires, Argentina.
- Ballaré, C.L., Scopel, A.L., Sánchez, R.A., 1990. Far-red radiation reflected from adjacent leaves: an early signal of competition in plant canopies. *Science* 247, 329-332.
- BCR, 2019. “Importancia económica del sector agropecuario y agroindustrial en la República Argentina”. AÑO XXXVII - N° Edición 1927 - 18 de Octubre de 2019. Datos disponibles en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/importancia>
- BCR, 2021. “Argentina embarcó granos por 56,5 millones de toneladas en el 2020, un 6% menos que el año anterior. AÑO XXXVIII - N° Edición 1988 - 22 de Enero de

2021. Datos disponibles en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/argentina-17>
- Bolaños, J., Edmeades, G.O. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Res.* 48, 65–80.
- Borrás, L., Gambín, B.L. 2010. Trait dissection of maize kernel weight: towards integrating hierarchical scales using a plant biomass framework. *Field Crops Res.* 118, 1–12.
- Budakli Carpici, e., Celok, n., Bayram, g., 2010. yield and quality of forage maize as influenced by plant density and nitrogen rate. *Turkish Journal of Field Crops*, 15(2): 128-132.
- Cantarero, M.G., Luque, S.F. y Rubiolo O.J. 2000. Efecto de la Época de siembra y la densidad de plantas sobre el número de granos y el rendimiento de un híbrido de maíz en la región central de Córdoba (Argentina).
- Casal, J.J., Sanchez, R.A., Deregibus, V.A., 1986. The effect of plant density on tillering: The involvement of R/FR ratio and the proportion of radiation intercepted per plant. *Environmental and Experimental Botany* 26, 365-371.
- Cerrudo A., Di Matteo J., Fernandez E., Robles M., Pico L. Olmedo, Andrade F. H. (2013) Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop and Pasture Science* **64**, 580-587.
- Chang L, He K, Liu J, Xue J (2016) Mapping of QTLs for leaf angle in maize under different environments. *J Maize Sci* 4:49–55

- Chen X, Xu D, Liu Z, Yu T, Mei X, Cai Y (2015) Identification of QTL for leaf angle and leaf space above ear position across different environments and generations in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica* 204(2):395–405.
- Chen, K., Camberato, J.J., Vyn, T.J., 2017. Maize grain yield and kernel component relationships to morphophysiological traits in commercial hybrids separated by four decades. *Crop Science* 57, 1641-1657.
- Claassen, M.M., Shaw, R.H. 1970. Water deficit effects on corn. II: Grain components. *Agron. J.* 64, 652-655.
- Du, X., Wang, Z., Lei, W., & Kong, L. (2021). Increased planting density combined with reduced nitrogen rate to achieve high yield in maize. *Scientific reports*, 11(1), 358.
- Duvick, D.N. (2005). Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica*. 50. 193-202.
- Duvick, D.N., 2005a. The Contribution of Breeding to Yield Advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 83-145.
- Duvick, D.N., Cassman, K.G., 1999. Post–Green Revolution Trends in Yield Potential of Temperate Maize in the North-Central United States. *Crop Science* 39, 1622-1630.
- Duvick, D.N., 1997. What is yield? In: *Developing drought- and low n-tolerant maize*.
- Echarte, L., Luque, S., Andrade, F., Sadras, V., Cirilo, A., Otegui, M., Vega, C. 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released

between 1965 and 1993, *Field Crops Research*, Volume 68, Issue 1, Pages 1-8, ISSN 0378-4290.

Elli, E. F., Edwards, J., Yu, J., Trifunovic, S., Eudy, D. M., Kosola, K. R., Schnable, P. S., Lamkey, K. R., & Archontoulis, S. V. (2023). Maize leaf angle genetic gain is slowing down in the last decades. *Crop Science*, 00, 1–14.

FAO, 2011. Actualidad agropecuaria de América Latina. Datos disponibles en: <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/505920/>

FAO, 2014. Food and Nutrition in Numbers. FAO, Rome . Datos disponibles en : <https://www.fao.org/publications/card/en/c/9f31999d-be2d-4f20-a645-a849dd84a03e/>

FAO, 2017. El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos.

FAOSTAT, Production quantities of Maize by country Average 1994 – 2020, 2020. Datos disponibles en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

FAOSTAT, Top 10 Commodities Production in Argentina 2020. Datos disponibles en: [https://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities\\_by\\_country](https://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities_by_country)

Fernández, C. 1992. Effective Selection Criteria for Assessing Plant Stress Tolerance.

Gou, L., J. Xue, B. Qi, B. Ma and W. Zhang. 2017. Morphological Variation of Maize Cultivars in Response to Elevated Plant Densities. *Agronomy Journal* 109: 1443-1453

- Hall, A.J., Lemcoff, J.H., Trapani, N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica*. 26, 19-38.
- Huang, S., Gao, Y., Li, Y., Xu, L., Tao, H., Wang, P. 2017. Influence of plant architecture on maize physiology and yield in the Heilonggang River valley, *The Crop Journal*, Volume 5, Issue 1, Pages 52-62, ISSN 2214-5141.
- Incógnito, S. 2019. Tolerancia al estrés por alta densidad en maíz (*Zea mays* L.): efecto del mejoramiento y bases genéticas determinantes de caracteres arquitecturales asociados
- Incognito, S. J. P., Maddonni, G. Á., & López, C. G. (2020). *Genetic control of maize plant architecture traits under contrasting plant densities*. *Euphytica*, 216(2).
- Kebrom, T.H., Brutnell, T.P., 2007. The molecular analysis of the shade avoidance syndrome in the grasses has begun. *Journal of Experimental Botany* 58, 3079- 3089.
- Ku, L.X., Zhao, W.M., Zhang, J. *et al.* Quantitative trait loci mapping of leaf angle and leaf orientation value in maize (*Zea mays* L.). *Theor Appl Genet* **121**, 951–959 (2010).
- Ku, L., Zhang, L., Tian, Z. et al., 2015. Dissection of the genetic architecture underlying the plant density response by mapping plant height-related traits in maize (*Zea mays* L.). *Molecular Genetics and Genomics* 290, 1223-1233.
- Lashkari, M., Madani, H., Ardakani, M.R. et al., 2011. Effect of Plant Density on Yield and Yield Components of Different Corn (*Zea mays* L.) Hybrids. *American Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 10, 450-457.

Lee, E.A., Tollenaar, M., 2007. Physiological Basis of Successful Breeding Strategies for Maize Grain Yield. *Crop Science* 47, 202-215.

Liu, G., Yang, Y., Liu, W., Guo, X., Xie, R., Ming, B., Xue, J., Zhang, G., Li, R., Wang, K., Hou, P., & Li, S. (2022). Optimized canopy structure improves maize grain yield and resource use efficiency. *Food and Energy Security*, 11, e375. <https://doi.org/10.1002/fes3.375>

Maddonni, G.A., Otegui, M.E., Cirilo, A.G, 2001b. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation, *Field Crops Research*, Volume 71, Issue 3, Pages 183-193.

Maddonni, G.A., Otegui, M.E., Cirilo, A.G., 2001b. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Research* 71, 183-193.

Maddonni, G.A., Otegui, M.E., 2004. Intra-specific competition in maize: early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Field Crops Research* 85, 1-13.

MAIZAR, 2018. Competitividad con desarrollo. “DINÁMICA DE LOS PLANTEOS DE MAÍZ EN LA ARGENTINA: DE DÓNDE VENIMOS Y HACIA DONDE VAMOS”

MEcon, 2019. INFORMES DE CADENAS DE VALOR, Ministerio de economía/hacienda. Datos disponibles en: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro\\_cadenas\\_de\\_valor\\_maiz.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadenas_de_valor_maiz.pdf)



Montgomery, E.G., 1911. Correlation studies in corn. Lincoln, NE. , 108–159.

OCDE-FAO, 2020. Perspectivas Agrícolas 2020-2029. Datos disponibles en:

<https://www.oecd-ilibrary.org/sites/ecf42a00-es/index.html?itemId=/content/component/ecf42a00-es#section-d1e17450>

Otegui, M.E., Nicolini, M.G., Ruiz, R.A., Dodds, P.A. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87, 29–33.

Mont, G.E., Pearce, R.B., Mock, J.J., 1977. Leaf Orientation and Yield of Maize1. *Crop Science* 17, 883-886.

Ramírez, 2017. Efecto de cuatro densidades de siembra y cuatro dosis de fertilizante N-P-K en el desarrollo y rendimiento del maíz (*Zea mays* L.).

Razquin, C.J; Maddonni, G.A y vega, C.R.C. 2017. Estimación no destructiva del área foliar en plantas individuales de maíz (*Zea mays* L.) creciendo en canopeos. *Agriscientia* [online]. Vol.34, n.1, pp.27-38.

Ritchie, S., Hanway, J., Benson, G. et al., 1993. How a corn plant develops. Iowa State University Cooperative Extension Service. Special Report 48.

Russell, W.A., 1991. Genetic Improvement of Maize Yields. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 245-298.

Russell, W., 1985. Evaluations for plant, ear, and grain traits of maize cultivars representing 7 eras of breeding. *Maydica* 30, 85-96.

Salve DA, Maydup ML, Salazar GA, Tambussi EA, Antonietta M. Canopy development, leaf traits and yield in high-altitude Andean maize under contrasting

plant densities in Argentina. *Experimental Agriculture*. 2023;59:e22.  
doi:10.1017/S0014479723000194

Sánchez Mendoza, S., Escalante Estrada, J., Rodríguez González, M. 2017. Área y ángulo foliar, coeficiente de extinción de luz y su relación con la biomasa y rendimiento en genotipos de maíz.

Sangoi, L., Gracietti, M.A., Rampazzo, C., Bianchetti, P. 2002. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density, *Field Crops Research*, Volume 79, Issue 1, Pages 39-51.

Smith, H., Whitelam, G., 1997. The shade avoidance syndrome: multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell and Environment* 20, 840-844.

Sonohat G, Bonhomme R (1998) Variations de structure aérienne de peuplements de maïs en fonction de la densité de semis. Implications pour la modélisation. . In *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes Environnementales, Les colloques de l'INRA*, INRA Editions, Paris, pp 403–421

Stewart, D. W.; Costa, C.; Dwyer, L. M.; Smith, D. L.; Hamilton, R. I.; Ma, B. L. (2003). Canopy Structure, Light Interception, and Photosynthesis in Maize. *Agronomy Journal*, 95(6), 1465–. doi:10.2134/agronj2003.1465

Tetio-Kagho, F., Gardner, F., 1988. Responses of maize to plant population density. I. Canopy development, light relationships, and vegetative growth. *Agronomy Journal* 80, 930-935.

- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture.
- Tollenaar, M., Wu, J., 1999. Yield Improvement in Temperate Maize is Attributable to Greater Stress Tolerance. *Crop Science* 39, 1597-1604.
- Troyer, A., 2000. *Temperate corn: Background, behavior, and breeding*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Turgut, I., Duman, A., Bilgili, U., Acikgoz, E. 2005. Alternate Row Spacing and Plant Density Effects on Forage and Dry Matter Yield of Corn Hybrids (*Zea mays* L.)
- Westgate, M.E., Forcella, F., Reicosky, D.C. et al., 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crops Research* 49, 249-258.
- Wies G, Maddonni GÁ (2020) Effects of phytochromes B on growth variability and competitive capacity of maize plants in a canopy. *Field Crop Res* 250:107765
- Yang, y., Guo, x., Liu, h., Liu, g., Liu, w., Ming, b., Xie, r., wang, k., Hou, p., li, s. (2021). The effect of solar radiation change on the maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution . *Journal of Integrative Agriculture*.