# Variabilidad genotípica de rasgos morfológicos relacionados con la captura de luz en una población de líneas endocriadas recombinantes de maíz (*Zea mays* L.)

Tesina

del alumno

**FEDERICO GUIDO GLORIANI**

Este trabajo ha sido presentado como requisito

para la obtención del título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

Carrera: Ingeniería Agronómica

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

Pergamino, 12 de Febrero de 2016

**Variabilidad genotípica de rasgos morfológicos relacionados con la captura de luz en una población de líneas endocriadas recombinantes de maíz (*Zea mays* L.)**

Tesina

del alumno

**FEDERICO GUIDO GLORIANI**

Aprobada por el Tribunal Evaluador de Tesina

..... ..... .....

Evaluador Evaluador Evaluador

..... .....

Ing. Agr. MSc. Mroginski, Erika Lic. Molins, Luciano

Director Codirector

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales

Universidad Nacional de Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

Tarda en llegar… y al final… al final… hay recompensa…

Gustavo Cerati (1959 – 2014)

**Agradecimientos**

- En primer lugar, a mi familia, quienes son el pilar de mi vida, siempre me bancaron y confiaron en mí cuando decidí estudiar esta hermosa carrera, y fueron mi sostén durante la realización de este trabajo.

- A mis Directores, la Ing. Agr. MSc. Erika Mroginski y el Lic. Luciano Molins, por guiarme durante la elaboración de este trabajo, brindarme muchísimo conocimiento y enseñarme la metodología de investigación para mi futura carrera profesional.

- A mi compañero y amigo Juan Ignacio Amas, por compartir conmigo toda esta experiencia desde el inicio del trabajo hasta el final, y haber compartido muchas lindas experiencias en todo este tiempo.

- A la Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires y a todos mis profesores, por haberme brindado tanto conocimiento, viajes y hermosas experiencias que jamás voy a olvidar; y todo ello me permite ser hoy un profesional.

- Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, tanto como institución, por haberme brindado el espacio físico para poder realizar mi tesina, como por haberme permitido realizar este trabajo junto a muchas personas de diferentes sectores (Maíz, Biotecnología y Ecofisiología) con quienes compartí maravillosas experiencias y momentos, además de haberme brindado ayuda en distintas etapas.

- A mis compañeros, con quienes compartí muchas lindas experiencias en estos años dentro de la Universidad y quedarán siempre en mi recuerdo.

- Y finalmente, a mis amigos de toda la vida, que de una u otra manera siempre estuvieron conmigo durante todos estos años en la Universidad.

# Índice

**1. Introducción**

1.1. El maíz: historia, distribución y uso……..……...7

1.2. Factores que determinan la productividad del maíz……..……..8

1.2.1. Radiación incidente……...9

1.2.2. Eficiencia en la captura de luz……...…9

1.2.3. Eficiencia en el uso de la radiación…….……10

1.3. Estructura del canopeo e inclinación de las hojas.....10

1.4. Mejoramiento en maíz……..……..14

1.5. Antecedentes del grupo de trabajo……15

**2. Hipótesis**……..16

**3. Objetivos**

3.1. Objetivo general……...16

3.2. Objetivos específicos……..……....16

**4. Materiales y métodos**

4.1. Material vegetal……17

4.2. Descripción y conducción del experimento……..18

4.3. Evaluaciones fenotípicas……19

4.4 Análisis estadístico……24

**5. Resultados**

5.1. Condiciones meteorológicas……..25

5.2. Normalidad de las variables……...…25

5.3. Estadísticos descriptivos y análisis de varianza……..26

5.4. Genotipos parentales……..…27

5.5. Correlaciones entre variables……..……..28

**6. Discusión**…….……30

**7. Conclusiones**……..……33

**8. Bibliografía**……..34

**9. Resumen**……..39

**10. Anexo**

10.1. Condiciones meteorológicas……41

10.2. Histogramas de frecuencias relativas de las variables fenotípicas evaluadas……..…….....43

# 1. Introducción

## 1.1. El maíz: historia, distribución y usos

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más cultivados y utilizados por el hombre en todo el mundo. Es una especie diploide (2n=20), perteneciente a la familia botánica *Poaceae*, una de las familias más importantes del reino vegetal, que contiene un gran número de especies y muchas de importancia económica. Su centro de origen está en México, desde donde se difundió a todo el mundo a partir de fines del Siglo XV, primero en América y luego hacia Europa, donde pasó a formar parte de la dieta humana y animal. Es cultivado en una gran diversidad de ambientes que abarcan un amplio rango de regiones climáticas, desde la zona tropical hasta los 58° de latitud norte en Canadá y Rusia, y hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile (Paliwal, 2001). En nuestro país es el segundo cultivo, junto con el trigo, con mayor superficie de siembra, después de la soja. En el año 2014 se sembraron 4,1 millones de hectáreas siendo las provincias de Buenos Aires y Córdoba los principales núcleos de producción, con una producción total de 25,7 millones de toneladas y un promedio de 76 quintales por hectárea (Bolsa de Comercio de Rosario, http://www.bcr.com.ar/pages/gea/estimaProd.aspx).

El grano de maíz se emplea para diferentes finalidades y usos. Además de su utilización en la alimentación humana directa y del ganado, se emplea en un gran número de productos industriales y en los últimos años en la producción de biocombustible (FAO, 2003; GBEP-FAO, 2008). Según el Consejo Internacional de Cereales (CIC), la cosecha Mundial de maíz 2015/2016 será de 968 millones de toneladas (http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/elevan-la-proyeccion-para-produccion-mundial-de-maiz-y-trigo-en-periodo-20152016).

Para garantizar el abastecimiento de las múltiples demandas de maíz existen dos alternativas no excluyentes que permitirían lograrlo: destinar más superficie a su cultivo y aumentar los rendimientos. Asumiendo que no habrá un incremento en el área de producción, para cubrir esta demanda se necesitará una tasa de crecimiento anual en la producción de 1,5% aproximadamente (Duvick & Cassman, 1999). El aumento de la producción

deberá reducir la brecha entre los rendimientos potenciales y los reales (Cassman *et al*., 2003; Fischer & Edmeades, 2010), principalmente a través de un mejor aprovechamiento de los recursos (captura y uso) cuando estos se encuentran en condiciones deficitarias.

### 1.2. Factores que determinan la productividad del maíz

Los rendimientos de maíz crecieron en forma sostenida en las últimas décadas. La notable mejora genética lograda fue en buena medida responsable de ese crecimiento, acompañada por mejoras en el manejo de los cultivos (fertilización, herbicidas, mecanización, etc.). No obstante, los rendimientos medios que se alcanzan actualmente están aún distantes de los rendimientos máximos obtenibles. Estas brechas entre los rendimientos reales y los potenciales pueden reducirse a partir de un mejor entendimiento de los procesos y mecanismos involucrados en la determinación del rendimiento del cultivo. Al aplicar la máxima tecnología disponible, la limitante para alcanzar los rendimientos potenciales la imponen factores ambientales no controlables como son la radiación solar y la temperatura (Muchow *et al*., 1990; Andrade, 1992). Al igual que en la mayoría de los cultivos, en maíz existe una estrecha relación entre el rendimiento y la producción de biomasa aérea, la cual depende de la cantidad de radiación solar disponible, de la capacidad del canopeo para interceptarla y de la eficiencia con que el cultivo convierte la radiación capturada en biomasa vegetal, siempre y cuando no existan limitaciones hídricas, nutricionales o sanitarias (Cárcova *et al.,* 2003; Cirilo *et al*., 2012).

La producción de fotoasimilados de un cultivo puede ser expresada en términos de su eficiencia para convertir radiación solar interceptada en biomasa:

$$B = R_{inc} * e_i * EUR * t$$

donde B = biomasa del cultivo (gramos (g) metros (m) $^{-2}$), $R_{inc}$ = radiación incidente (Mega Joule (MJ) $m^{-2}$), $e_i$ = eficiencia de intercepción de la radiación,

EUR = eficiencia en el uso de la radiación (g $MJ^{-1}$), t = tiempo o largo de duración del ciclo del cultivo (días) (modificado de Cárcova *et al.,* 2003).

### 1.2.1. Radiación incidente

La radiación incidente varía con la ubicación geográfica (latitud) y con la época del año, y ciertas prácticas culturales como la elección de la fecha de siembra y la duración del ciclo del genotipo permiten maximizar su aprovechamiento. De la radiación total incidente, solo la fracción fotosintéticamente activa (RFA) del espectro visible (ubicada entre 400 y 700 nanómetros) es aprovechada por el cultivo (Cárcova *et al.,* 2003).

### 1.2.2. Eficiencia en la captura de luz

El aprovechamiento de la oferta de radiación por un cultivo en una localidad dada está condicionado por la oportunidad y duración de su crecimiento, en función de la fecha de siembra, el largo del ciclo del genotipo y los factores que controlan su desarrollo. Cuanto mayor sea la duración del ciclo del cultivo, mayor será la cantidad de radiación interceptada acumulada durante una determinada estación de crecimiento (Cirilo *et al*., 2012).

La dinámica de intercepción de radiación del cultivo está fuertemente ligada a la evolución del Índice de Área Foliar (IAF), definido como la superficie foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie de suelo. El IAF se genera con la aparición y expansión de las hojas y es producto del número de hojas y del tamaño de las mismas. Watson (1947) concibió el término “índice de área foliar”, que es la relación del área de hojas (tomada sobre una sola cara de las mismas) del cultivo con respecto al área de suelo. Debido a que la radiación solar cubre toda la superficie de suelo, el IAF es una medida robusta de área foliar por unidad de radiación solar disponible. La temperatura modifica en forma substancial el IAF debido a sus efectos sobre la duración del período de diferenciación de hojas, la tasa de aparición y el tamaño de las mismas (Cirilo & Andrade, 1994). Para lograr altos valores de intercepción de la radiación en un cultivo, es importante generar en forma temprana un IAF que

permita interceptar rápidamente la mayor proporción de radiación incidente (i.e. 95%) (Cárcova *et al.,* 2003).

La eficiencia de absorción de radiación por parte del canopeo depende del IAF y del coeficiente de extinción de la radiación (*k*), este último relacionado con la estructura del canopeo en lo que se refiere a la forma de la hoja, su inclinación, distribución y orientación (Bergamaschi *et al*., 2010). En general, se acepta que el porcentaje de RFA interceptado por un canopeo se relaciona con el IAF a través de la siguiente función de tipo exponencial:

$$fRFA = a\,(1 - e^{-k * IAF})$$

donde fRFA = fracción de RFA interceptada por el canopeo, a = valor del *"plateau*" o techo, *k* = coeficiente de atenuación lumínico, IAF = índice de área foliar (Maddonni & Otegui, 1996; Miralles & Slafer, 1997; Trápani *et al.,* 1992).

### 1.2.3 Eficiencia en el uso de la radiación

La eficiencia en el uso de la radiación se refiere a la cantidad de biomasa producida por unidad de radiación interceptada (MJ) por el canopeo (Cárcova *et al.*, 2003). El maíz es muy eficiente en convertir radiación en biomasa gracias a su metabolismo fotosintético de tipo C4, superando a otros cultivos extensivos como la soja y el trigo con metabolismo C3. En un día diáfano de verano en la zona maicera núcleo argentina, un cultivo de maíz libre de limitaciones hídricas, nutricionales o sanitarias es capaz de acumular entre 350 y 400 kg de materia seca por hectárea (Andrade *et al*., 1996).

## 1.3. Estructura del canopeo e inclinación de las hojas

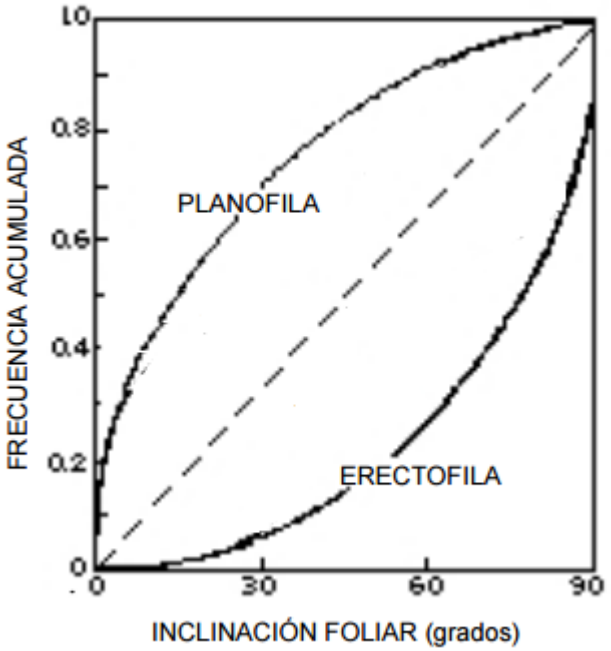
El canopeo de un cultivo es una estructura compleja de un determinado arreglo espacial de las hojas. Este actúa como un captador de la radiación y su estructura ejerce influencia sobre la temperatura y la concentración de vapor de agua en el ambiente de la planta, afectando los procesos de fotosíntesis, transpiración y crecimiento (Montemayor Trejo *et al*., 2006). Por lo tanto, una apropiada arquitectura foliar, con hojas erectófilas en la parte superior de las

plantas influye en la morfología del canopeo y permite un aumento en la captura de la luz mediante la fotosíntesis, actuando como reservorio de nitrógeno para el llenado del grano y a su vez permitiendo una mayor densidad de siembra con un mayor índice de área foliar (Sinclair & Sheehy, 1999).

Las hojas superiores de un cultivo absorben luz solar directa y en menor medida luz difusa mientras las hojas basales absorben muy poca luz solar directa. La luz difusa proviene de la luz transmitida por las hojas y de la reflejada por la superficie del suelo. A medida que los haces de luz atraviesan los estratos del cultivo hasta llegar al suelo, cambian su calidad, ya que la luz transmitida por las hojas es predominantemente infrarroja. Así, de la RFA, la longitud de onda que llega a la base del canopeo corresponde a las ondas más largas (700 nanómetros) (Gardner *et al.*, 1985).

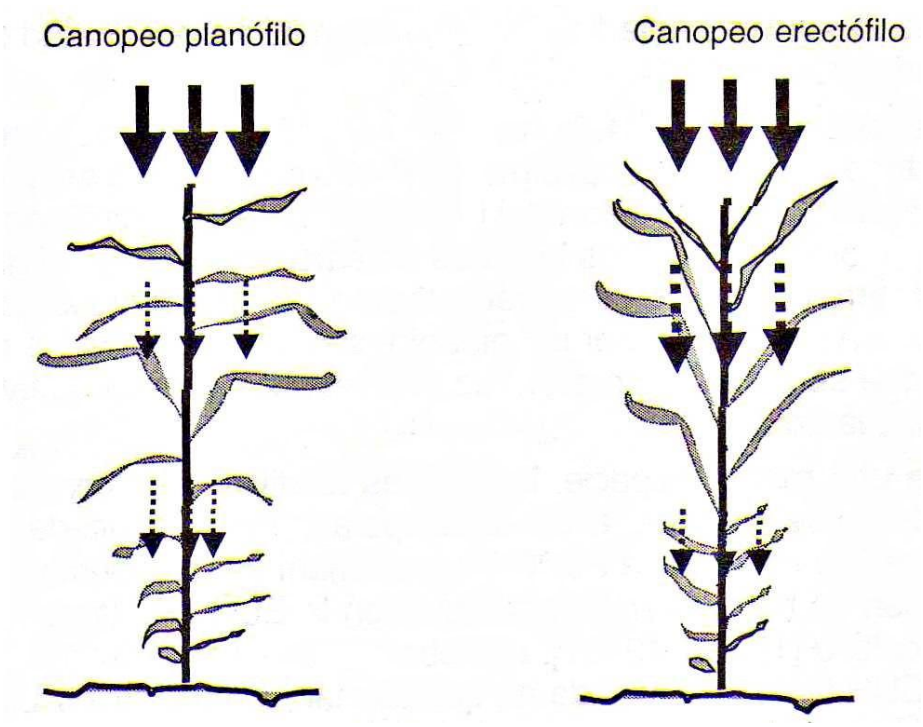
Los distintos tipos de inclinación de hojas han sido definidos e ilustrados por De Wit (1965). Los canopeos de tipo planófilos son aquellos en donde sus hojas están dispuestas prácticamente horizontales, con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal menor a 35º y los de tipo erectófilos son aquellos en donde la mayoría de las hojas están prácticamente verticales, con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal mayor a 60º (Figura 1).

**Figura 1:** Distribución idealizada de frecuencias acumuladas de la inclinación de hojas en dos tipos de canopeos. La línea punteada representa un tipo de distribución uniforme (modificado de De Wit, 1965).




La inclinación de las hojas afecta la intercepción y distribución de la radiación dentro del canopeo. El valor de *k*, conocido como coeficiente de atenuación lumínica, depende de las propiedades ópticas y geométricas del canopeo entre las que cabe mencionar el ángulo que forman las hojas con la vertical y su disposición en el plano horizontal. Así, canopeos erectófilos, con menor ángulo de inserción de las hojas con respecto al tallo presentan un menor valor de *k* que aquellos planófilos (Pepper *et al*., 1977). A medida que aumenta el coeficiente de atenuación, mayor es la proporción de la radiación interceptada por unidad de área foliar (Figura 2).

**Figura 2:** Esquema de la radiación incidente (líneas continuas) y transmitida (líneas punteadas) en un canopeo planófilo o erectófilo (extraído de Satorre *et al.,* 2003).




Para el cultivo de maíz, se han observado cambios en el coeficiente *k* a lo largo del ciclo de crecimiento (Cárcova *et al*., 2003), lo cual indica que este coeficiente es variable dentro del canopeo según las alturas donde se tomen las mediciones de la radiación, de acuerdo a lo estudiado por Camacho *et al.* (1995).

La inclinación de las hojas puede variar en los diferentes estratos dentro del canopeo. Una estructura ideal del mismo sería cuando la luz se distribuye uniformemente entre todas las hojas (Gardner *et al.*, 1985). Los canopeos con hojas inclinadas verticalmente en la parte superior y que a medida que nos acercamos al suelo gradualmente se disponen más horizontales han sido definidos como los ideales (Trenbath & Angus, 1975). Esta disposición foliar permite que las hojas superiores intercepten menos radiación y dejen pasar más luz hacia las hojas inferiores, logrando que la radiación sea distribuida más equitativamente sobre el total del área foliar. En maíz, se ha observado que la predominancia de hojas erectas por sobre la inflorescencia femenina origina

una mayor penetración de luz, dando las tasas de producción más altas (Williams *et al*., 1968).

El canopeo del maíz está integrado por hojas con hábito erectófilo y buena separación vertical entre ellas, lo que le otorga un bajo coeficiente de extinción lumínica que posibilita una penetración y distribución más uniforme de la luz en el perfil del canopeo (Maddonni & Otegui, 1996). Ello le confiere ventajas comparativas para la fotosíntesis una vez alcanzados altos valores de cobertura (Cirilo *et al.,* 2012).

### 1.4. Mejoramiento en maíz

El mejoramiento genético es un proceso de incremento continuo en la búsqueda de nuevas recombinaciones de genes que permitan disponer de un cultivar que exprese mayores niveles de rendimiento, calidad, tolerancia a condiciones de estrés biótico y abiótico. Se basa en la selección deliberada de un grupo de individuos, que serán los progenitores de la siguiente generación (Eyhérabide, 2006).

El mejoramiento genético de maíz más simple ha sido el realizado durante siglos por los agricultores al seleccionar visualmente por características de la espiga o del grano que se ajustaban a sus necesidades alimenticias. Durante el siglo XX el mejoramiento de la especie tomó un impulso muy importante gracias a los avances en Genética. A principios de ese siglo, Shull (1909) propuso la utilización del método de endocría e hibridación a fin de aprovechar el fenómeno de heterosis que exhibían los cruzamientos entre razas o genotipos poco emparentados. La existencia de heterosis se evidencia por un mayor vigor de los individuos híbridos respecto a sus progenitores para caracteres relacionados con la aptitud reproductiva, entre ellos el rendimiento de grano (Cirilo *et al.,* 2012).

La variabilidad genética existente dentro de una especie en términos de índice de área foliar, arquitectura del canopeo y proporción de radiación incidente que intercepta el cultivo, representa una oportunidad útil para los programas de mejoramiento orientados a aumentar el rendimiento. En maíz, el mejoramiento genético para la eficiencia en la captación de luz depende del mejoramiento de características tales como el ángulo de inserción de las hojas,

su distribución en el canopeo, el índice de área foliar y la duración del área foliar verde (Maddonni & Otegui, 1996). La arquitectura de planta es un carácter agronómico fundamental, en el cual los mejoradores deberán poner especial atención para lograr mejorar dicha variable, lo cual se traducirá en un aumento en la densidad (mas plantas en una misma área), lo que llevará a un aumento en los rendimientos (Ku *et al*., 2010).

### 1.5. Antecedentes del grupo de trabajo

En la EEA INTA Pergamino, se desarrollaron las metodologías necesarias para evaluar determinados atributos asociados a la eficiencia en la captación de luz, tales como área foliar verde máxima por planta, ángulo de inserción de las hojas y duración del área foliar verde en un número elevado de genotipos (D´Andrea *et al*., 2006 y 2009). Estos atributos se evaluaron en líneas endocriadas de maíz, se seleccionaron líneas contrastantes para los caracteres antes mencionados y a partir del cruzamiento entre estas, por autofecundaciones aleatorias sucesivas bajo un esquema de *Single Seed Descent* (SSD), se generaron tres poblaciones de RIL $F_6$. En este trabajo se empleó una población de RIL proveniente del cruzamiento entre las líneas parentales LP179 y L5605.

## 2. Hipótesis

Existe variabilidad genotípica asociada a caracteres morfológicos relacionados con la captura de luz en la población de líneas endocriadas recombinantes de maíz empleada en el presente trabajo, y los mismos están relacionados con la producción final de biomasa aérea y el rendimiento en granos por planta.

## 3. Objetivos

### 3.1. Objetivo general

Generar información fenotípica necesaria para el posterior estudio de caracteres determinantes de la captura de luz en maíz con marcadores moleculares, con el propósito de identificar QTL asociados a los mismos.

### 3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la variabilidad genotípica asociada a caracteres morfológicos relacionados con la captación de radiación solar en una población de líneas endocriadas recombinantes de maíz.

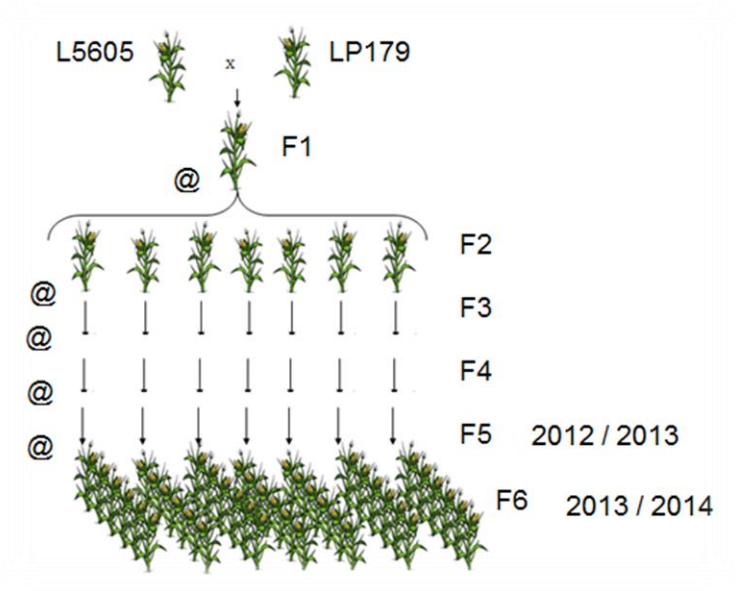
- Determinar la existencia de correlaciones de dichos caracteres con la producción final de biomasa aérea y el rendimiento en granos.

# 4. Materiales y métodos

## 4.1. Material vegetal

El material genético evaluado estuvo constituido por una población estabilizada de 100 RIL $F_6$, obtenida a partir del cruzamiento inicial entre las líneas L5605 x LP179 y sucesivas generaciones de autofecundación sin selección. La línea LP179, la cual se caracteriza por ser foliosa, planófila y de follaje persistente, deriva de una sintética Suwan seleccionada por adaptación al medio-oeste de Estados Unidos y posteriormente introducida en Argentina. Posee textura tipo *flint* con grano de color anaranjado y es de ciclo completo. La línea L5605 es poco foliosa, erectófila y de follaje senescente. La misma fue obtenida por endocría hasta estabilización a partir del cruzamiento entre las líneas LP116 x P578. A su vez, LP116 deriva por endocría de la Sintética Argentino – Caribe y P578 es una línea derivada del cruzamiento entre germoplasma argentino y de Estados Unidos. Todos los materiales fueron desarrollados por la EEA INTA Pergamino. Las semillas del material genético correspondiente a las RIL $F_6$ fueron obtenidas por autofecundación de las RIL $F_5$, durante la campaña 2012/2013 (Figura 3).

**Figura 3:** Esquema del proceso de obtención de la población de RIL empleada en el presente trabajo.



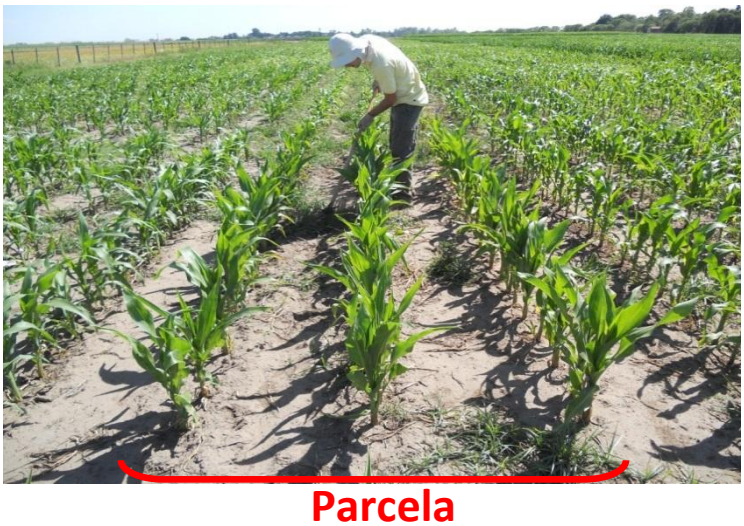
## 4.2. Descripción y conducción del experimento

El experimento fue realizado en secano, en el campo de la EEA INTA Pergamino (33° latitud Sur, 54° longitud Oeste) durante la campaña 2013-2014. La siembra se realizó manualmente, los días 6/11/2013 (la primera repetición) y 12/11/2013 (la segunda repetición).

Cada parcela correspondiente a un mismo genotipo, estaba formada por tres surcos de 5 metros de largo, distantes 0,7 metros entre surcos y una distancia entre plantas dentro del surco de 0,16 metros (Figura 4). Éstas fueron sembradas con 3 semillas por golpe y posteriormente raleadas en el estadío $V_3$ (tres hojas expandidas con la lígula visible)(Ritchie & Hanway, 1986). La densidad final aproximada fue de 9 plantas $m^{-2}$ (90.000 plantas/hectárea (ha)).

El germoplasma correspondiente a las RIL más las dos líneas parentales se distribuyeron en un diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con dos repeticiones.

**Figura 4**: Imagen en la que puede observarse la vista general del ensayo a campo. Se detalla en rojo la parcela formada por tres surcos.




La fertilización consistió en la aplicación de 200 Kg/ha de fosfato di amónico (18-20-0) durante la siembra y en el estadío $V_7$-$V_8$ 500 Kg de urea granulada (46-0-0), distribuidos uniformemente en todo el experimento.

Para el control de malezas en pre-emergencia se aplicaron 2 litros (l) $ha^{-1}$ de Atrazina al 50% (1-cloro-3-etilamino-5-isopropilamino-2,4,6-triazina) y 3 l $ha^{-1}$ de Glifosato (N-fosfonometil-glicina-isopropilamina). Durante el ciclo del cultivo, el control se realizó manualmente mediante azada y también químicamente, mediante el uso de mochila, empleando los productos: Sempra® (halosulfuron-metil 75% WG) 80 g $ha^{-1}$, Gramoxone® (dicloruro de paraquat: 1,1'-dimetil-4,4'-bipiridilio) 2 l $ha^{-1}$ y Basagran® (bentazon 60% 3-isopropil-1H-2,1,3-benzotidiazina-4-(3H)ona-2,2-dióxido) 3,8 l $ha^{-1}$.

### 4.3. Evaluaciones fenotípicas

En la fase fenológica de $V_4$ se marcaron tres plantas en el surco central de cada parcela sobre las cuales se realizaron todas las mediciones no destructivas hasta madurez fisiológica, momento en el cual se cosecharon las correspondientes plantas marcadas (Figura 5).

**Figura 5**: Imagen en la que se muestra la planta marcada y seleccionada para realizar las mediciones no destructivas.

Se efectuaron las siguientes mediciones:

- **Área foliar por planta en floración (AF, en $cm^2$):** se determinó el área foliar de la hoja de la espiga (HE) y de las 3 hojas inmediatamente superiores (HE+1, HE+2, HE+3) en floración debido a que varios genotipos presentaron algunas de sus hojas inferiores y/o superiores a éstas totalmente senescentes en dicho estado fenológico. A su vez, este grupo de hojas son las que contribuyen en mayor proporción al crecimiento de la espiga bajo condiciones de alta densidad de plantas (Ma & Subedi, 2005). Se efectuó la medición del largo (L) y ancho máximo (A) en cm, y mediante la utilización de la fórmula: L x A x 0,75 (Montgomery, 1911) se calculó el área foliar de cada una de las hojas. La sumatoria del área foliar de la totalidad de las hojas medidas constituyó el área foliar por planta en floración.

- **Altura de planta (ALT, cm):** considerada desde el nivel del suelo hasta la lígula de la hoja superior.

- **Altura de inserción de la espiga (ALTES, cm):** considerada desde el nivel del suelo hasta el nudo de inserción de la espiga.

- **Número de hojas (NH):** se marcaron las hojas correspondientes a la posición 5 y 10 para luego contar el número de hojas totales, en floración.

- **Ángulo promedio de inserción vertical de las hojas en floración (ANG, grados):** ángulo existente en un plano definido entre la hoja y el tallo. Este dato se tomó para todas las hojas que se encontraban por encima de la espiga (ángulos α) (Maddonni & Otegui, 1996), y se calculó el promedio como ANG = $(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_n)/ n$, siendo n el número total de hojas por encima de la espiga (Figura 6).

**Figura 6:** Esquema de los ángulos de inserción vertical de las hojas ($\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$, $\alpha_4$, $\alpha_5$).

- **Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo (fRFAI):** fue determinada durante el llenado de granos, a los 39 (fRFAI-1) y 47 días (fRFAI-2) desde la fecha promedio de $R_1$ (emisión de estigmas o "silking"). Para ello, se utilizó un sensor ceptómetro de 1 metro de longitud marca comercial Cavadevices® (Figura 7). Ambas determinaciones se realizaron en días soleados, entre las 11:30 y las 14:30 horas. En cada parcela se efectuó una medición de la radiación incidente (en µMol de fotones $m^{-2}$ $s^{-1}$) por encima del canopeo y tres mediciones de la radiación transmitida debajo del mismo. En este último caso, se colocó el sensor de manera diagonal a los surcos, debajo de las hojas verdes pero por encima de aquellas inferiores que se encontraron senescidas al momento de la medición. Los valores de radiación solar global, incidente y transmitida, fueron transformados a RFA mediante la multiplicación por el factor 0,45 (Monteith, 1965). La RFA interceptada por el canopeo en cada parcela se calculó como la diferencia entre la RFA incidente (promedio de 10 parcelas contiguas) y el promedio de la RFA transmitida (promedio de 3 mediciones en una misma parcela). Este valor fue utilizado para determinar fRFAI, a través de su relación con la RFA incidente: fRFAI = RFA interceptada/RFA incidente (Maddoni & Otegui, 1996).

**Figura 7:** Sensor ceptómetro marca Cavadevices®.

- **Biomasa aérea en madurez fisiológica (BA, g planta $^{-1}$):** en madurez fisiológica se cosecharon todas las plantas marcadas y fueron secadas en estufa a 65°C hasta peso constante. La totalidad del material de cada planta se pesó en una balanza comercial para determinar la biomasa aérea en madurez fisiológica. Luego se diferenciaron las fracciones grano y espiga de la parte vegetativa.

- **Número de granos por planta (NGP, granos planta$^{-1}$):** se obtuvo a partir de los recuentos del número de granos de cada espiga granada cosechada. En los casos de más de una espiga granada por planta, se sumaron los granos de todas las espigas de cada planta.

- **Rendimiento en granos por planta (RGP, g planta$^{-1}$):** Las espigas granadas de cada planta se separaron del resto del material vegetal, se trillaron manualmente y se pesaron los granos para obtener el rendimiento en granos.

- **Peso individual del grano (PG, miligramos (mg) grano$^{-1}$):** se calculó como el cociente entre RGP y NGP.

- **Índice de cosecha (IC):** se calculó como el cociente entre RGP y BA.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de todas las variables fenotípicas evaluadas en la población bajo estudio.

Los datos climáticos de la campaña 2013-2014 fueron recopilados por el observatorio meteorológico situado dentro del predio de la EEA INTA Pergamino. Se utilizó la información referente a temperaturas en abrigo meteorológico (mínima, media y máxima, en °C), heliofanía efectiva (en horas y décimos), humedad relativa media (en porcentaje) y precipitaciones (en mm). Todos los datos fueron registrados diariamente.

**Tabla 1:** Resumen de todas las variables fenotípicas evaluadas en la población bajo estudio.

| Variable | Descripción |
|---|---|
| AF | Área foliar por planta en floración ($cm^2$) |
| ALT | Altura de planta (cm) |
| ALTES | Altura de inserción de la espiga (cm) |
| NH | Número de hojas totales en floración |
| ANG | Ángulo promedio de inserción vertical de las hojas en floración (grados) |
| fRFAI-1 | Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo a los 39 días de $R_1$ |
| fRFAI-2 | Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo a los 47 días de $R_1$ |
| BA | Biomasa aérea en madurez fisiológica (g $planta^{-1}$) |
| NGP | Número de granos por planta (granos $planta^{-1}$) |
| RGP | Rendimiento en granos por planta (g $planta^{-1}$) |
| PG | Peso individual del grano (mg $grano^{-1}$) |
| IC | Índice de cosecha |

## 4.4 Análisis estadístico

Se estableció la normalidad de las variables analizadas mediante la distribución en histogramas de frecuencia y a través de la prueba de Shapiro-Wilks modificado, considerando que las variables presentaban distribución normal cuando el valor del estadístico W era mayor o igual a 0,95.

Para determinar la existencia de variabilidad entre los genotipos, se efectuó el análisis de la varianza (ANOVA), previa transformación de las variables cuando fue requerido. Las correlaciones entre los caracteres se analizaron mediante la matriz de los coeficientes de correlación de Pearson (r). El análisis de datos fue llevado a cabo con el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al*., 2010).

# 5. Resultados

## 5.1. Condiciones meteorológicas

En la Tabla 2 se presentan los valores medios mensuales de temperatura (máxima, media y mínima), heliofanía efectiva, humedad relativa y precipitaciones para el período Noviembre 2013 - Mayo 2014. Los gráficos correspondientes a la evolución de los valores diarios de dichas variables meteorológicas para dicho período se encuentran en el Anexo 10.1.

**Tabla 2**: Valores medios mensuales de temperatura (máxima, media y mínima), heliofanía efectiva, humedad relativa y precipitaciones para el período Noviembre 2013 - Mayo 2014.

| Mes | Temperaturas | | | Heliofanía efectiva | Humedad relativa | Precipitaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Máx. °C | Media °C | Mín. °C | Hs y décimos | % | Total mm |
| **nov-13** | 26,5 | 20,3 | 14 | 7,1 | 76 | 173 |
| **dic-13** | 33 | 25,3 | 17,7 | 7,5 | 68 | 20,4 |
| **ene-14** | 30,7 | 24 | 18,2 | 7,7 | 75 | 279,6 |
| **feb-14** | 25,4 | 20,7 | 16 | 2,8 | 87 | 315,5 |
| **mar-14** | 24,8 | 18,6 | 12,1 | 5,6 | 75 | 114 |
| **abr-14** | 22,7 | 17,1 | 11,6 | 6,3 | 76 | 134,5 |
| **may-14** | 18,2 | 13,5 | 8,8 | 4,2 | 82 | 120,5 |

## 5.2. Normalidad de las variables

La normalidad de los datos fue confirmada para la mayoría de las variables (ALT, ALTES, NH, AF, ANG, fRFAI-1, fRFA-2 y BA) mediante la prueba de Shapiro-Wilks modificado, presentando valores del estadístico W superiores o iguales a 0,95 (Tabla 3). Asimismo sus histogramas de frecuencia mostraron distribución muy similar a la normal (Anexo 10.2.). Las variables NGP, RGP, PG e IC no se ajustaron a una distribución normal y debieron ser transformadas previo al análisis de varianza. Las variables NGP, RGP e IC fueron transformadas mediante la raíz cuadrada y el PG mediante potencia ($y^2$).

**Tabla 3**: Test de normalidad Shapiro-Wilks modificado para las variables analizadas.

| Variable | W* |
|---|---|
| ALT | 0,98197 |
| ALTES | 0,98366 |
| NH | 0,97673 |
| AF | 0,98539 |
| ANG | 0,97957 |
| fRFAI-1 | 0,97255 |
| fRFAI-2 | 0,97488 |
| BA | 0,97892 |
| NGP | 0,90162 |
| RGP | 0,89920 |
| PG | 0,94102 |
| IC | 0,93241 |

### 5.3. Estadísticos descriptivos y análisis de varianza

Los resultados obtenidos del análisis de varianza junto con los estadísticos descriptivos para cada variable analizada se presentan en la Tabla 4. Se detectaron diferencias altamente significativas ($p<0,01$) entre genotipos para todas las variables analizadas (ALT, ALTES, NH, AF, ANG, fRFAI-2, BA, NGP, RGP, PG, IC), excepto fRFAI-1 ($p=0,123$).

**Tabla 4**: Resumen de medidas estadísticas de las variables analizadas: número total de genotipos evaluados en las dos repeticiones (n); Media; Desvío estándar (D.E); Valor mínimo (Mín); Valor máximo (Máx); Asimetría; Kurtosis; Valor de probabilidad (p-valor); Coeficiente de Variación (CV) y Coeficiente de determinación ($R^2$) obtenidos del análisis de varianza.

| Variable | Unidades | n | Media | D.E. | Mín | Máx | Asimetría | Kurtosis | p-valor | CV | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ALT** | cm | 204 | 88,87 | 13,57 | 53,50 | 119,50 | -0,13 | -0,39 | <0,0001 | 10,03 | 0,79 |
| **ALTES** | cm | 204 | 44,88 | 9,09 | 22,90 | 70,50 | 0,26 | -0,09 | <0,0001 | 13,06 | 0,79 |
| **NH** | - | 204 | 20,31 | 1,21 | 17,00 | 23,33 | 0,16 | -0,26 | <0,0001 | 3,55 | 0,82 |
| **AF** | $cm^2$ | 204 | 1005,2 | 213,0 | 485,9 | 1595,5 | 0,15 | -0,28 | <0,0001 | 13,11 | 0,81 |
| **ANG** | grados | 204 | 26,96 | 6,01 | 12,87 | 44,60 | 0,40 | 0,06 | <0,0001 | 11,26 | 0,87 |
| **fRFAI-1** | - | 204 | 0,34 | 0,14 | 0,05 | 0,70 | 0,17 | -0,69 | 0,1230 | 37,46 | 0,59 |
| **fRFAI-2** | - | 204 | 0,25 | 0,12 | 0,02 | 0,59 | 0,30 | -0,35 | 0,0003 | 37,73 | 0,69 |
| **BA** | g | 204 | 80,98 | 23,45 | 25,93 | 151,63 | 0,34 | 0,23 | 0,0001 | 22,28 | 0,71 |
| **NGP** | - | 204 | 81,23 | 65,07 | 0,00 | 318,67 | 1,11 | 1,05 | <0,0001* | 32,24* | 0,75* |
| **RGP** | g | 204 | 16,94 | 14,02 | 0,00 | 71,29 | 1,13 | 1,32 | <0,0001* | 34,27* | 0,74* |
| **PG** | mg | 204 | 196,70 | 43,05 | 0,00 | 291,33 | -1,14 | 3,64 | <0,0001* | 27,91* | 0,73* |
| **IC** | - | 204 | 0,18 | 0,12 | 0,00 | 0,49 | 0,51 | -0,71 | <0,0001* | 29,94* | 0,73* |

* Valores que corresponden a las transformaciones previas al ANOVA

## 5.4. Genotipos parentales

En la Tabla 5 se muestran los valores promedio obtenidos por los genotipos parentales (LP179 y L5605) para cada una de las variables analizadas. Ambos parentales sólo presentaron diferencias estadísticamente significativas (según la prueba de LSD Fisher, $\alpha = 0,05$) en las variables ALT, ALTES y ANG. La línea parental L5605, mostró una mayor altura total, mayor altura de inserción de la espiga y un menor ángulo promedio de inserción vertical de las hojas, presentando un canopeo más erectófilo con respecto a LP179. Por el contrario, en LP179 se observaron plantas de menor altura y con una inserción de la espiga más baja y con una estructura de canopeo más planófila (mayor ángulo promedio de inserción vertical de las hojas).

Con respecto a la intercepción de la radiación, a los 39 días desde R1, L5605 interceptó un 40% de la RFA incidente mientras que LP179 interceptó el 28%. A los 47 días, la fracción de la RFA interceptada por L5605 disminuyó (fRFAI-2 = 22%), mientras que para LP179 permaneció casi constante (fRFAI-2 = 25%).

**Tabla 5**: Valores promedio de las líneas parentales LP179 y L5605 para: altura de planta (ALT), altura de inserción de la espiga (ALTES), número de hojas totales (NH), área foliar (AF), ángulo promedio de inserción vertical de las hojas (ANG), fracción de la RFA interceptada por el canopeo a los 39 y 47 días desde $R_1$ (fRFAI-1 y fRFAI-2), biomasa aérea en madurez fisiológica (BA), número de granos por planta (NGP), rendimiento en grano por planta (RGP), peso individual del grano (PG) e Índice de cosecha (IC).

| Variable | LP179 | L5605 | Fisher |
|---|---|---|---|
| **ALT** | 86,50 | 110,25 | * |
| **ALTES** | 41,05 | 53,10 | * |
| **NH** | 19,33 | 20,33 | ns |
| **AF** | 1110,90 | 918,66 | ns |
| **ANG** | 34,41 | 24,78 | * |
| **fRFAI-1** | 0,28 | 0,40 | ns |
| **fRFAI-2** | 0,25 | 0,22 | ns |
| **BA** | 92,54 | 84,25 | ns |
| **NGP** | 61,00 | 77,83 | ns |
| **RGP** | 15,42 | 20,92 | ns |
| **PG** | 246,45 | 240,24 | ns |
| **IC** | 0,16 | 0,21 | ns |

*: diferencia significativa según Fisher, ns: diferencia no significativa

## 5.5 Correlaciones entre variables

El análisis de correlaciones entre variables a través de la matriz de los coeficientes de Pearson (r) se presenta en la Tabla 6. En general, se encontró correlación positiva entre todas las variables analizadas, excepto ANG y NH.

El ANG se correlacionó en forma negativa ($p<0,05$) solamente con ALT y con AF. NH presentó correlación positiva con ALT, BA y NGP ($p<0,05$), ALTES ($p<0,001$), fRFAI-1 y fRFAI-2 ($p<0,01$).

**Tabla 6**: Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r).

| Variables | ALT | ALTES | NH | AF | ANG | fRFAI-1 | fRFAI-2 | BA | NGP | RGP | PG | IC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ALT | 1 | | | | | | | | | | | |
| ALTES | 0,75*** | 1 | | | | | | | | | | |
| NH | 0,17* | 0,35*** | 1 | | | | | | | | | |
| AF | 0,33*** | 0,26*** | 0,07ns | 1 | | | | | | | | |
| ANG | -0,14* | -0,05ns | -0,04ns | -0,18** | 1 | | | | | | | |
| fRFAI-1 | 0,41*** | 0,42*** | 0,20** | 0,32*** | -0,00ns | 1 | | | | | | |
| fRFAI-2 | 0,31*** | 0,41*** | 0,20** | 0,34*** | 0,05ns | 0,49*** | 1 | | | | | |
| BA | 0,23*** | 0,36*** | 0,17* | 0,40*** | -0,10ns | 0,24*** | 0,32*** | 1 | | | | |
| NGP | 0,17* | 0,38*** | 0,17* | 0,36*** | 0,08ns | 0,35*** | 0,37*** | 0,47*** | 1 | | | |
| RGP | 0,21** | 0,40*** | 0,13ns | 0,36*** | 0,05ns | 0,37*** | 0,38*** | 0,47*** | 0,96*** | 1 | | |
| PG | 0,19** | 0,22** | -0,02ns | 0,08ns | 0,00ns | 0,20** | 0,17* | 0,15* | 0,29*** | 0,45*** | 1 | |
| IC | 0,09ns | 0,28*** | 0,10ns | 0,21** | 0,06ns | 0,27*** | 0,28*** | 0,32*** | 0,90*** | 0,93*** | 0,47*** | 1 |

***, **, * Valor de probabilidad asociado p<0,001, p<0,01 y p<0,05; ns: no significativo

## 6. Discusión

Se encontraron diferencias significativas entre los genotipos para las variables morfológicas altura de planta, altura de inserción de la espiga, número de hojas, área foliar y ángulo de inserción foliar, indicando la existencia de variabilidad genotípica asociada a dichos caracteres en la población de líneas endocriadas recombinantes de maíz bajo estudio, coincidiendo con la primera parte de la hipótesis planteada. Dichas variables, con excepción del ángulo de inserción, se encontraron asociadas a la captura de luz. Por otro lado, mientras que la altura de planta, altura de inserción de la espiga y área foliar se correlacionaron con variables asociadas al rendimiento, el número de hojas y su ángulo de inserción no presentaron asociación con dichas variables, por lo tanto, también se podría aceptar la segunda parte de la hipótesis.

El crecimiento de las RIL en el campo no se vio favorecido por las condiciones ambientales durante la campaña 2013-2014, lo que puede verse reflejado tanto en la Tabla 2 como en los gráficos del Anexo 10.1., donde se observa la evolución de algunas variables climáticas durante el período de crecimiento del cultivo. Durante la segunda mitad del mes de diciembre las temperaturas elevadas y bajas precipitaciones podrían haber limitado el crecimiento y la expansión foliar de las líneas, ya que el cultivo se encontraba en estadíos vegetativos donde normalmente presenta un alto crecimiento. Por lo mencionado anteriormente, el estado general del cultivo presentó plantas de menor altura y escaso desarrollo foliar, comparado con otras campañas; esto concuerda con lo mencionado por varios investigadores, quienes han encontrado que el déficit hídrico durante la etapa vegetativa del cultivo produce una disminución en la altura de las plantas y el área foliar (Watts, 1974; Muchow & Carberry, 1989; NeSmith & Ritchie, 1992). Asimismo, durante la segunda mitad de enero se registraron nuevamente elevadas temperaturas. Esto coincidió con el período crítico del cultivo para determinar el número de granos. Posiblemente el NGP, el RGP y el PG no presentaron distribución normal debido a las condiciones climáticas, dado que en general pocas plantas presentaron espigas completas y hubo predominancia de bajos valores de RGP, el cual a su vez está determinado principalmente por el NGP y en menor porcentaje por el PG. El hecho de que durante el periodo crítico, en el cual se

produce la fijación de granos, las plantas estuvieran expuestas a un estrés térmico e hídrico podría explicar los bajos rendimientos en la mayoría de las RIL, lo cual produjo una distribución de este carácter alejado de la normal. Tanto la BA, el NGP, el RGP y el IC presentaron valores promedio inferiores a los informados por D'Andrea *et al*. (2006, 2009), quienes evaluaron distintos atributos morfológicos en un grupo de líneas endocriadas de maíz en condiciones de baja y adecuada disponibilidad de N, y bajo condiciones de riego. Por otro lado, los valores promedio obtenidos para el número total de hojas y el peso individual del grano fueron similares a los obtenidos por D'Andrea *et al*. (2006, 2009). Esto podría estar indicando que, el NH tiene un fuerte control genético independientemente de los factores ambientales; mientras que el PG a pesar de presentar altos valores medios, no pudo compensar los bajos valores de NGP.

En este experimento, las RIL presentaron bajos valores de intercepción de radiación en comparación a D'Andrea *et al*. (2006, 2009). Esto podría explicarse por las condiciones climáticas desfavorables durante el período vegetativo, que afectaron la expansión foliar y el crecimiento, hecho que se reflejó en las bajos valores de altura de planta, área foliar e intercepción de radiación obtenidos. Por otro lado, los elevados registros pluviométricos y prolongada nubosidad durante fines de enero y febrero ocasionaron períodos de exceso de humedad y anegamientos, imposibilitando el registro de la intercepción de radiación alrededor de floración, dado que para ello se requieren días totalmente despejados entre las 11:30 y las 14:30 horas. Por tal motivo, las mediciones no se realizaron en floración cuando la planta posee su valor máximo de área foliar. En su lugar, este dato se registró en una etapa avanzada del ciclo de cultivo (período de llenado de granos) cuando las plantas ya tenían algunas de sus hojas senescidas y por lo tanto el área foliar verde que se encuentra interceptando radiación es menor.

La predominancia de hojas erectas en maíz por encima de la inflorescencia origina una mayor penetración de luz, dando las tasas de producción de biomasa más altas (Williams *et al.,* 1968). La ventaja de los canopeos erectófilos con respecto a los planófilos radica en que poseen la capacidad de aprovechar más eficientemente la oferta de radiación porque esta se distribuye más equitativamente sobre el total del área foliar y permite que las

hojas basales perduren más tiempo siendo fotosintéticamente activas. En ambientes de alta potencialidad se busca que la radiación se distribuya más equitativamente a través del canopeo y por eso son deseables los genotipos con hojas erectófilas principalmente por encima de la espiga, porque en un ambiente de elevada densidad de siembra, cuando el cultivo cierra el surco las hojas basales dejan de recibir luz y senescen. En el presente estudio, debido al estrés térmico e hídrico que sufrieron las plantas durante el período vegetativo, las mismas no alcanzaron altos valores de cobertura y por ello las diferencias encontradas en los genotipos respecto al ángulo de inserción foliar no se reflejan en mayores intercepciones de luz, explicando la ausencia de correlación entre el ángulo de inserción foliar con la intercepción de radiación y las variables de rendimiento. En este sentido, Montemayor Trejo *et al.* (2006) encontraron que la penetración de la radiación solar es afectada por la densidad de las plantas y la estructura de las hojas, mostrando que las hojas verticales por encima de la espiga sólo reflejan una asociación con mayor intercepción de luz a altas densidades.

Posiblemente existan otras características de la arquitectura de la planta de maíz, como longitud de entrenudos por encima de la espiga (Ku *et al.*, 2015) o el punto de quiebre foliar (Ku *et al.*, 2010) que se deberían analizar en un futuro experimento, ya que estos tal vez podrían ayudar a explicar la relación con respecto a la intercepción de luz, producción de biomasa y el número de granos por planta.

## 7. Conclusiones

En el presente trabajo se confirmó la existencia de variabilidad genotípica asociada a los caracteres morfológicos relacionados con la captura de luz en la población de líneas endocriadas recombinantes bajo estudio. También se encontró relación entre estos caracteres estudiados y la producción de biomasa aérea y el rendimiento en granos por planta, excepto el número de hojas y el ángulo de inserción vertical de las hojas que no presentaron correlación con estos dos caracteres.

La caracterización fenotípica de la población segregante de RIL estudiadas, junto con la información molecular adecuada, permitiría identificar QTL asociados a caracteres morfológicos relacionados con la captura de luz y acelerar los programas de mejoramiento que se desarrollan actualmente mediante la selección asistida por marcadores moleculares. En este caso en particular, los genotipos exploraron condiciones de estrés abiótico, por lo cual los QTL que puedan identificarse estarían relacionados con la expresión de las variables bajo dicho estrés.

La sugerencia es repetir el experimento bajo condiciones ambientales sin estrés, a modo de encontrar QTL estables a través de ambientes contrastantes.

## 8. Bibliografía


- Andrade, F.H. (1992). “Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz”. Boletín Técnico 106. Est. Exp. Agr. Balcarce, Argentina. 16 pp.

- Andrade, F.H.; Cirilo, A.G.; Uhart, S.A. & Otegui, M.E. (1996). “Ecofisiología del Cultivo de Maíz”. Editorial La Barrosa-EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp.

- Bergamaschi, H.; Dalmago, G.A.; Bergonci, J.I.; Menegassi Bianchi Krüger, C.A.; Machado Heckler, B.M. & Comiran, F. (2010). “Intercepted solar radiation by maize crops subjected to different tillage systems and water availability levels”. Pesq. Agropec. Bras. 45 (12):1331-1341.

- Camacho, R.G.; Garrido, O. & Lima, M.G. (1995). “Caracterización de nueve genotipos de maíz *(Zea mays* L.) en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz”. Sci. Agric., Piracicaba, 52(2): 294-298.

- Cárcova, J.; Abeledo, G. L. & López Pereira, M. (2003). “Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo”. Satorre, E. H. *et al.* (ed.). Editorial Facultad de Agronomía UBA, Bs. As., pp 73–98.

- Cassman, K.G.; Dobermann, A.; Walters, D.T. & Yang, H. (2003). “Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality”. Annu. Rev. Environ. Resour. 28:315–358.

- Cirilo, A. G. & Andrade, F. H. (1994). “Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning”. *Crop Sci*. 34: 1039-1043.

- Cirilo, A.G.; Andrade, F.; Maddonni, G.; Vega, C. & Valentinuz, O. (2012). “Ecofisiología del Cultivo de Maíz”. *En*: Eyhérabide, G.H (ed). Bases para el manejo del cultivo de Maíz. Ediciones INTA, Bs.As. pp. 25-56.

- D`Andrea, K.E.; Otegui, M.E.; Cirilo, A.G. & Eyhérabide, G. (2006). “Genotypic Variability in Morphological and Physiological Traits among Maize Inbred Lines-Nitrogen Responses”. Crop Sci. 46: 1266-1276.

- D’Andrea, K.E.; Otegui, M.E.; Cirilo A.G. & Eyhérabide, G. (2009). “Ecophysiological traits in maize hybrids and their parental inbred lines: Phenotyping of responses to contrasting nitrogen supply levels”. Field Crops Research 114: 147-158.

- De Wit, C.T. (1965). “Photosynthesis of leaf canopies”. Agricultural Research Reports Wageningen, Versl.Landbouwkd.Onderz.Ned, 663, pp.

- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M. & Robledo, C.W. InfoStat versión (2010). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

- Duvick, C.N. & Cassman, K.G. (1999). “Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States”. Crop Sci. 39: 1622-1630.

- Eyhérabide, G. H. (2006). “Mejoramiento genético de maíz y su trayectoria en la Argentina”. En: ‘Maíz y Nutrición’. Informe sobre los usos y las propiedades nutricionales del maíz para la alimentación humana y animal. Ed: Maizar. Recopilación de ILSI Argentina. Vol. II, 14-21.

- FAO. (2003). Anuario. “Los Granos alimentarios”. Cap. Maíz.

- Fischer, R.A. & Edmeades, G.O. (2010). “Breeding and cereal yield progress”. Crop Sci 50: 85–98.

- Gardner, F.P.; Pearce, R.B. & Mitchel R.L. (1985). “Crop Fixation by crop canopies. In Gardner”. E.P. (ED.) Physiology of crop plants. Iowa State University Press: 31-57.

- GBEP-FAO (2008). “A review of the current state of bioenergy development in G8 +5 countries. Global Bioenergy Partnership Secretariat; Food and Agriculture Organization of the United Nations; Environment, Climate Change and Bioenergy Division”. Rome, Italy, pp 302.

- Ku, L.; Zhao, W.M., Zhang, J.; Wu, L.C.; Wang, C.L.; Wang, P.A.; Zhang, W.Q. & Chen, Y.H. (2010). “Quantitative trait loci mapping of leaf angle and leaf orientation value in maize (*Zea mays* L.)”. Theor. Appl. Genet. 121: 951-959.

- Ku, L.; Cao, L.; Wei, X.; Su, H.; Tian, Z.; Guo, S.; Zhang, L.; Ren, Z.; Wang, X.; Zhu, Y.; Li, G.; Wang, Z. & Chen, Y. (2015). “Genetic Dissection of Internode Length Above the Uppermost Ear in Four RIL Populations of Maize (Zea mays L.)”.

- Ma, B.L.; Subedi, K.D. (2005). “Development, yield, grain moisture and nitrogen uptake of Bt corn hybrids and their conventional near-isolines”. Field Crops Research. 93: 199-211.

- Maddonni, G.A. & Otegui, M.E. (1996). “Leaf area, light interception, and crop development in maize”. Field Crops Research. 48: 81-87.

- Miralles, D. J. & Slafer, G. A. (1997). “Radiation interception and radiation use efficiency of near-isogenic wheat lines with different height”. *Euphytica* 97: 201-208.

- Monteith, J.L. (1965). “Radiation and crops”. Exp. Agric. 1: 241-251.

- Montemayor Trejo, J.A.; Zermeño González, A.; Olague Ramirez, J.; Aldaco Nuncio, R.; Fortis Hernández, M.; Salazar Sosa, E.; Rodríguez Ríos, J.C. & Vázquez-Vázquez, C. (2006). “Efecto de la densidad y estructura del dosel de maíz en la penetración de la radiación solar”. Revista Internacional de Botánica Experimental. 75: 47-53.

- Montgomery, E.G. (1911). “Correlation studies of corn”. Nebraska Agricultural Station Annual Report, Lincoln, v. 24, p.108-159.

- Muchow, R.C. & Carberry, P.S. (1989). “Environmental control of phenology and leaf growth in tropically adapted maize”. Field Crops Research 20: 221-236.

- Muchow, R.C.; Sinclair, T.R. & Bennett, J.M. (1990). ”Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations”. Agron. J. 82: 338-343.

- NeSmith, D.S. & Ritchie, J.T. (1992). “Short and long term responses of corn to pre-anthesis soil wáter déficit”. Agronomy Journal 84: 107-113.

- Paliwal, R.L. (2001). “Introducción al maíz y su importancia”. En: “El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción”. Autor principal: Paliwal, R.L.

- Pepper, G.E.; Perce, R.B.; & Mock, J.J. (1977). “Leaf orientation and yield of maize”. *Crop Sci.* 17: 883-886.

- Ritchie, S.W. & Hanway, J.J. (1986). “How a corn plant develops”. Special Report No.48. Iowa State University and Technology Cooperative Extension Service, Ames Iowa. 21 pp.

- Satorre, E.H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. (2003). “Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo”. Editorial Facultad Agronomía. UBA.

- Shull, G.H. (1909). “A pure line method of corn breeding”. Am. Breeders´ Assoc. Rep. 5: 51-59.

- Sinclair, T.R. & Sheehy, J.E. (1999). “Erect leaves and photosynthesis in rice”. Science. 283: 1455.

- Trápani, N.; Hall, A. J.; Sadras, V.O. & Vilella, F. (1992). “Ontogenic changes in radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crops”. *Field Crops Res.* 29: 301-316.

- Trenbath B.R. & Angus J.F. (1975). “Leaf inclination and crop production”. Field Crop Abstracts, 28, 231-244.

- Watson, D.J. (1947). “Comparative physiological studies on the growth of field crops”. Ann. Bot. NS. 11, 41-76.

- Watts, W.R. (1974). “Leaf extensión in *Zea mays*. III. Field measurement of leaf extensión in response to temperature and leaf water potential”. Journal of Experimental Botany 25: 1085-1096.

- Williams, W.A.; Loomis, R.S.; Duncan, W.S.; Dovrat, A.; Nuñez, F. (1968). “Canopy architecture at various population densities and growth and grain yield of corn”. Crop Science 8. 303.

## 9. Resumen

La obtención de altos rendimientos en maíz se explica principalmente por una alta fijación de número de granos por unidad de superficie, sin embargo, el peso de los mismos es otra variable de mucha importancia, el cual se relaciona con la fuente fotosintética disponible para llenar dichos granos. La intercepción de la radiación por parte del canopeo es el primer factor del proceso de fotosíntesis para producir carbohidratos para las diversas necesidades del cultivo, tales como aumento de biomasa y llenado de granos.

En el presente trabajo se evaluaron diferentes atributos morfológicos relacionados con la captura de luz y el rendimiento a través de una población de 100 líneas endocriadas recombinantes $F_6$ de maíz, derivada del cruzamiento entre dos líneas parentales contrastantes para los caracteres mencionados (L5605 y LP179).

Los objetivos del presente estudio fueron caracterizar la variabilidad genotípica de caracteres asociados a la captura de luz en la población empleada y determinar la existencia de correlaciones de dichos caracteres con la producción final de biomasa aérea y el rendimiento en granos por planta.

El experimento fue conducido en secano dentro del campo de la EEA INTA Pergamino, durante la campaña 2013-2014. Se detectaron diferencias altamente significativas ($p<0,01$) entre genotipos para todas las variables morfológicas estudiadas. En cuanto a las variables asociadas a la intercepción de luz y al rendimiento, también se detectaron diferencias altamente significativas ($p<0,01$) en la mayoría de las variables estudiadas, excepto en la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el canopeo a los 39 días de $R_1$ ($p=0,1230$).

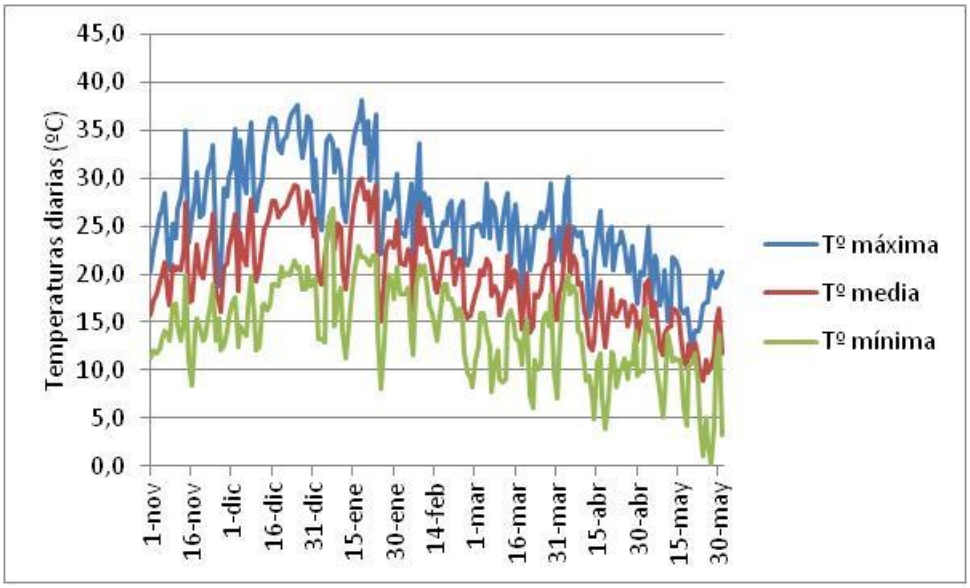
Las asociaciones entre variables se establecieron a través de la matriz de los coeficientes de correlación de Pearson (r). Las variables morfológicas estudiadas, con excepción del ángulo de inserción, se encontraron asociadas a la captura de luz. Por otro lado, mientras que la altura de planta, altura de inserción de la espiga y área foliar se correlacionaron con variables asociadas al rendimiento, el número de hojas y su ángulo de inserción no presentaron asociación con dichas variables.

Este trabajo generó la información fenotípica necesaria para el comienzo del estudio de estos atributos con marcadores moleculares, con el fin de identificar loci de caracteres cuantitativos (QTL) asociados a los mismos.

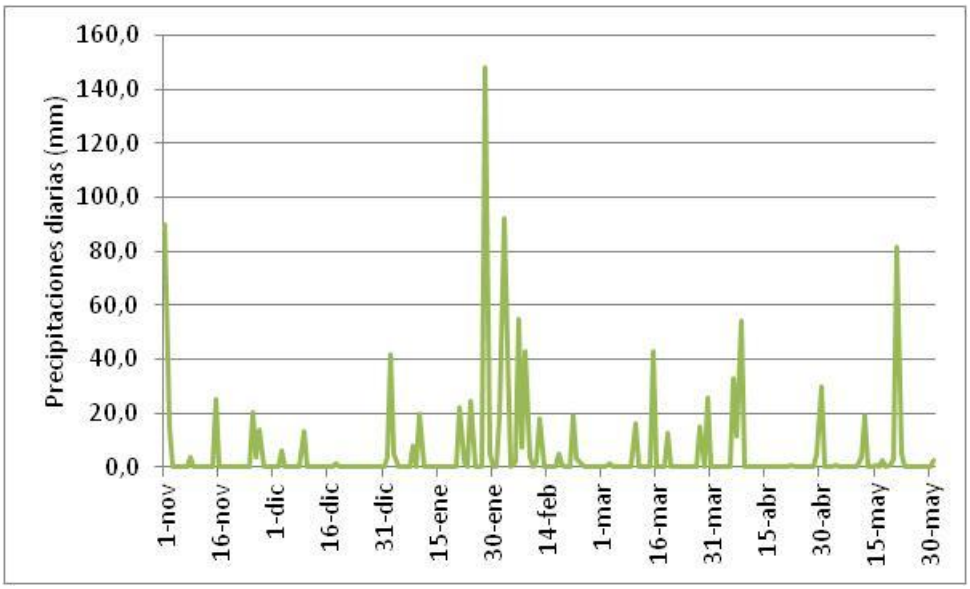
# 10. Anexo

## 10.1. Condiciones meteorológicas

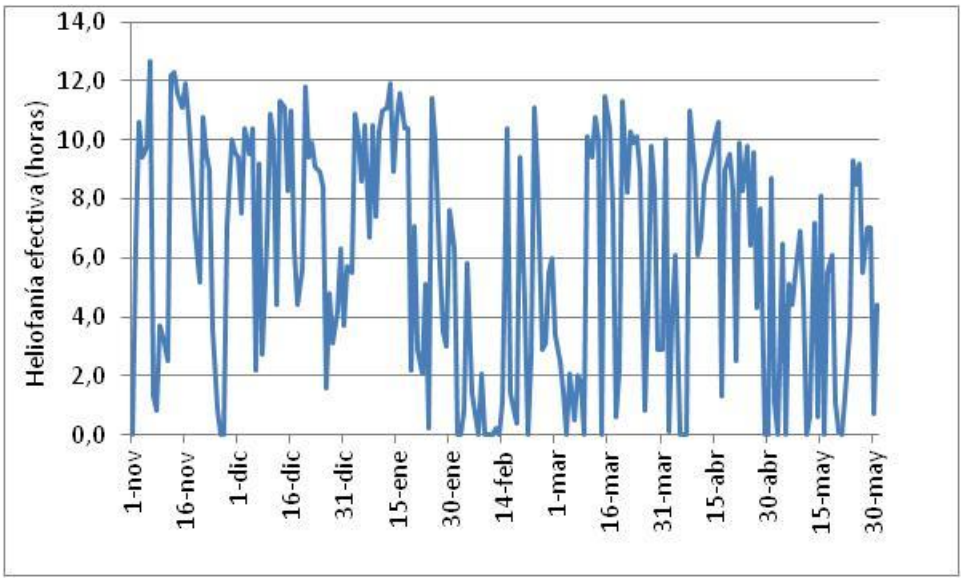
Evolución de los valores diarios de temperatura máxima, media y mínima, para el período Noviembre 2013 - Mayo 2014.



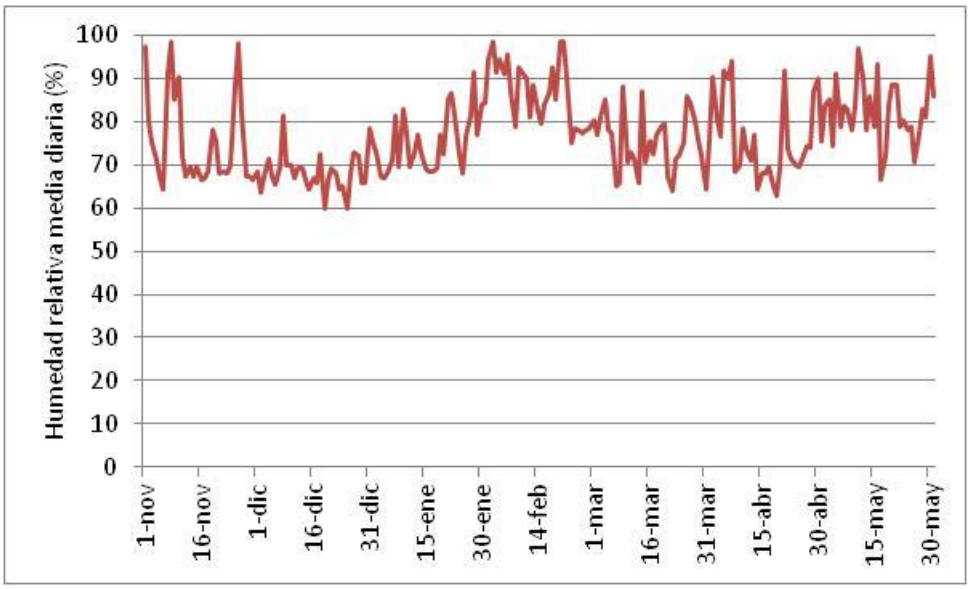

Evolución de los valores diarios de precipitaciones, para el período Noviembre 2013 - Mayo 2014.



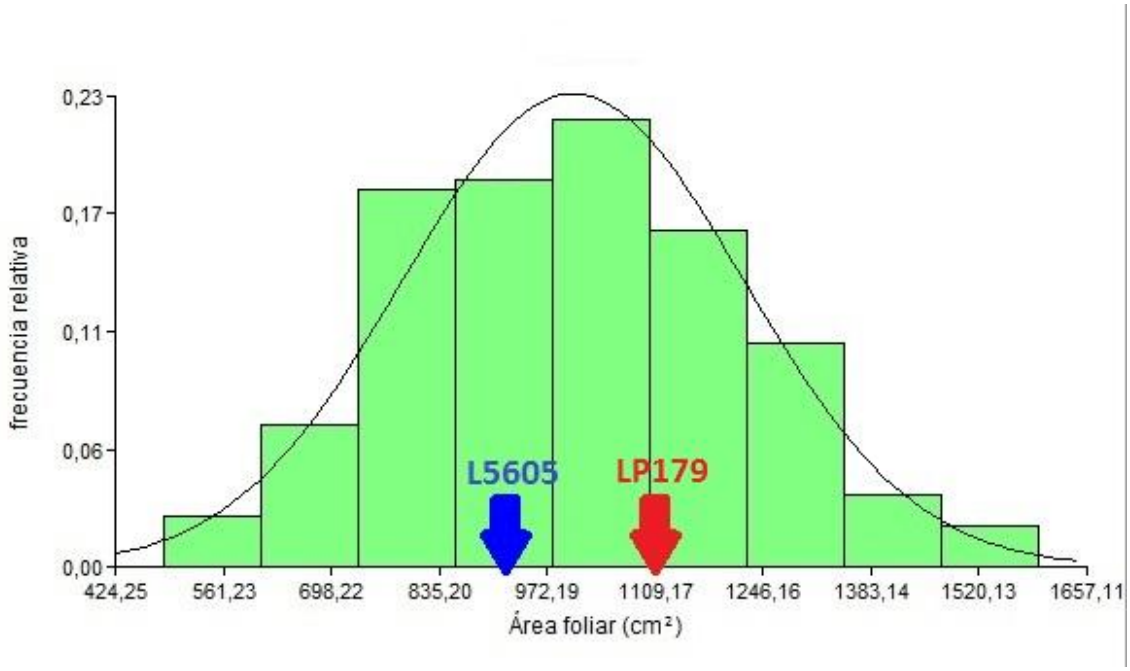
Evolución de los valores diarios de heliofanía efectiva, para el período Noviembre 2013 - Mayo 2014.

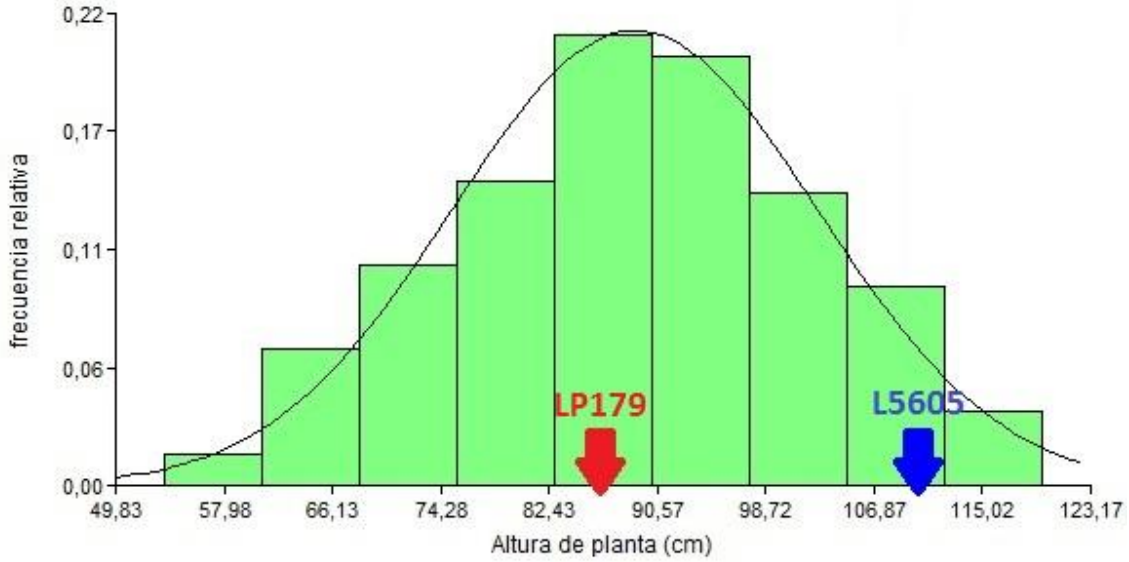



Evolución de los valores diarios humedad relativa, para el período Noviembre 2013-Mayo 2014.

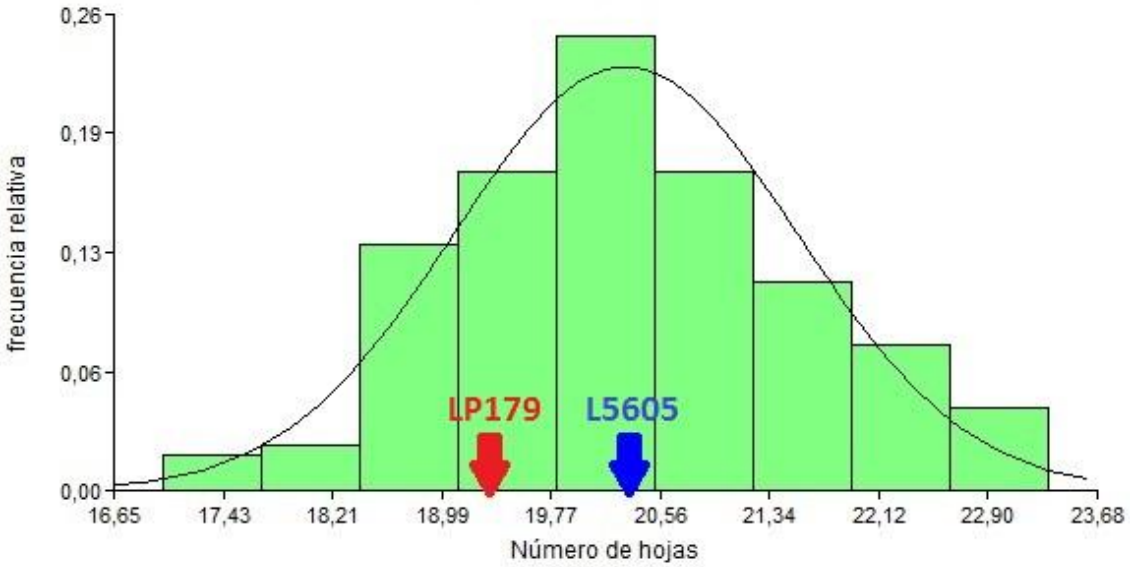


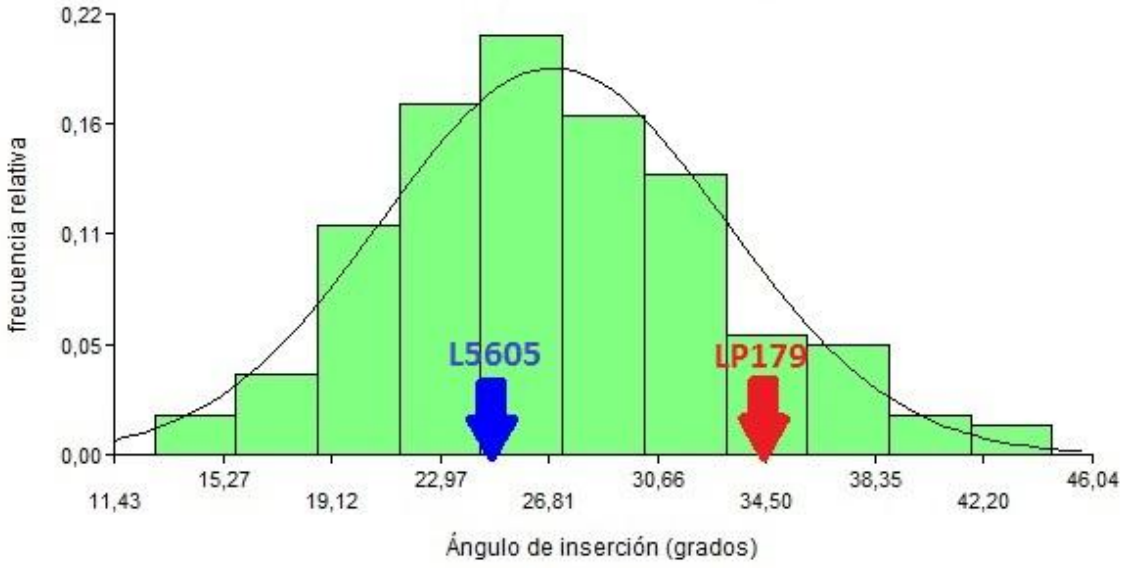
**10.2. Histogramas de frecuencias relativas de las variables fenotípicas evaluadas.**

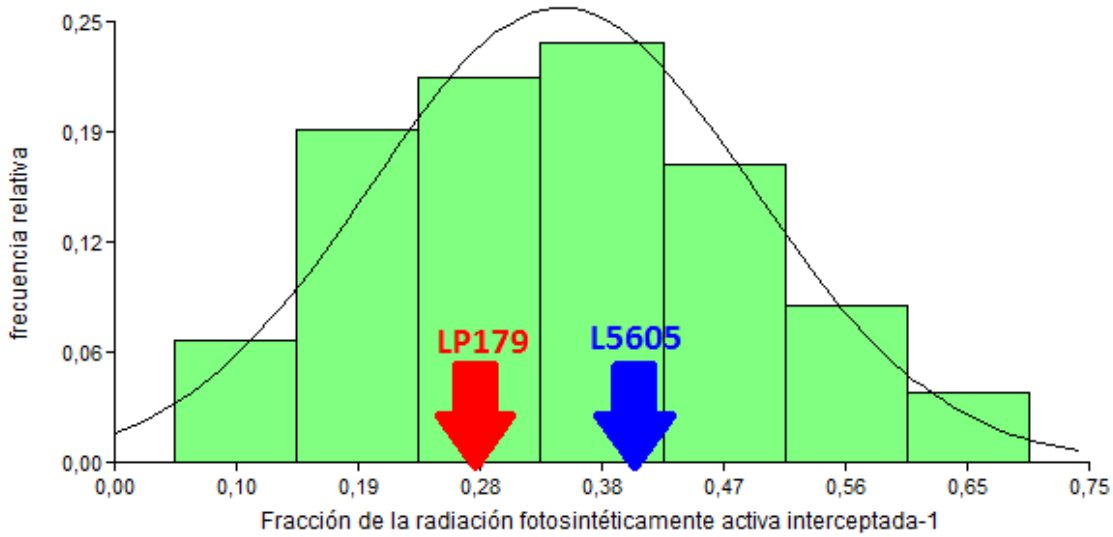


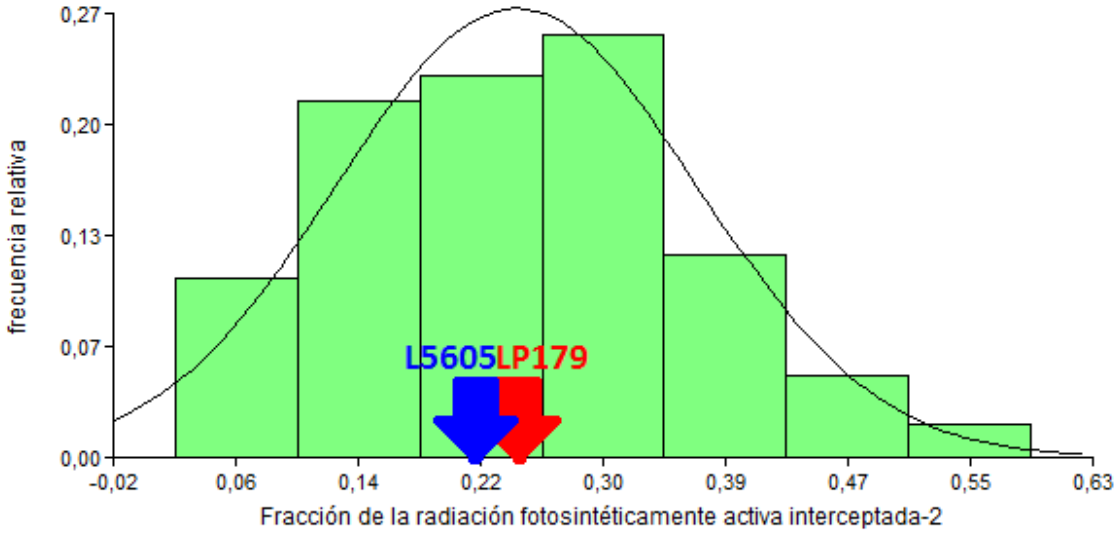



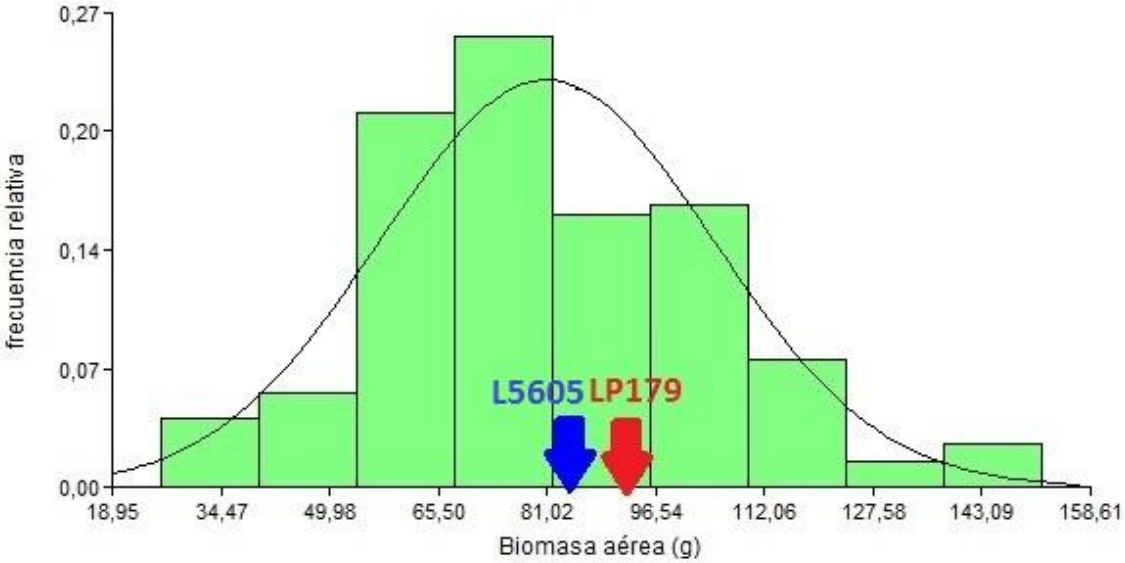
0,22
0,16
0,11
0,05
0,00
frecuencia relativa
LP179
L5605
20,74
26,51
32,28
38,05
43,82
49,58
55,35
61,12
66,89
72,66
Altura de inserción de la espiga (cm)

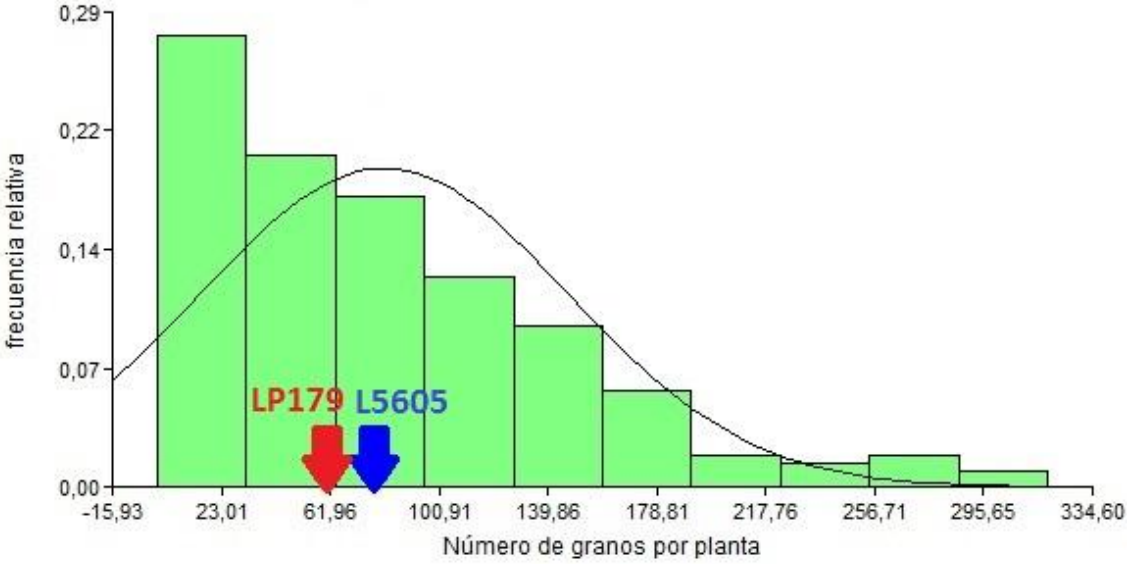

0,26
0,19
0,13
0,06
0,00
frecuencia relativa
LP179
L5605
16,65
17,43
18,21
18,99
19,77
20,56
21,34
22,12
22,90
23,68
Número de hojas

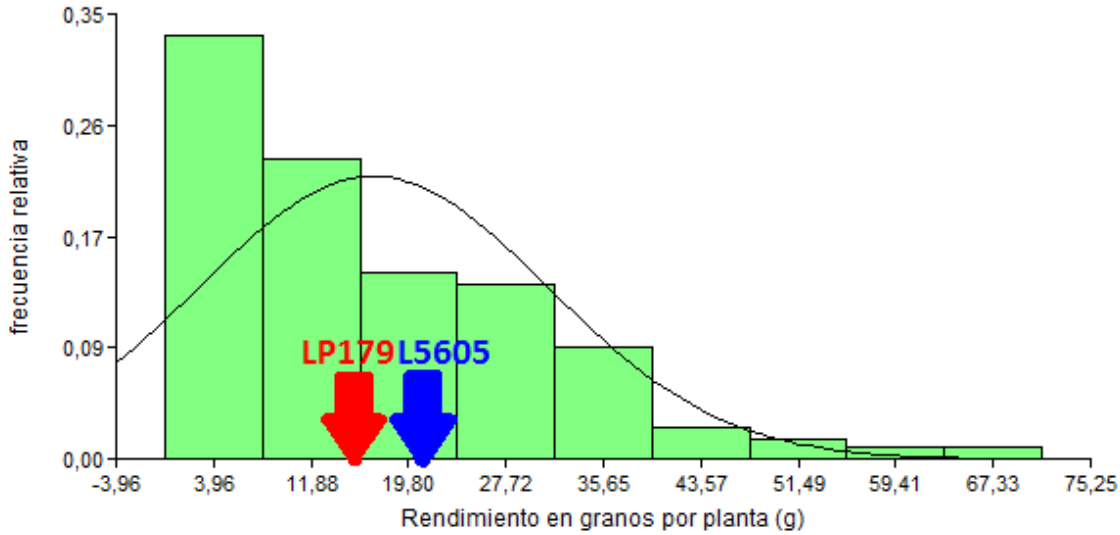

0,22
0,16
0,11
0,05
0,00
frecuencia relativa
L5605
LP179
11,43
15,27
19,12
22,97
26,81
30,66
34,50
38,35
42,20
46,04
Ángulo de inserción (grados)

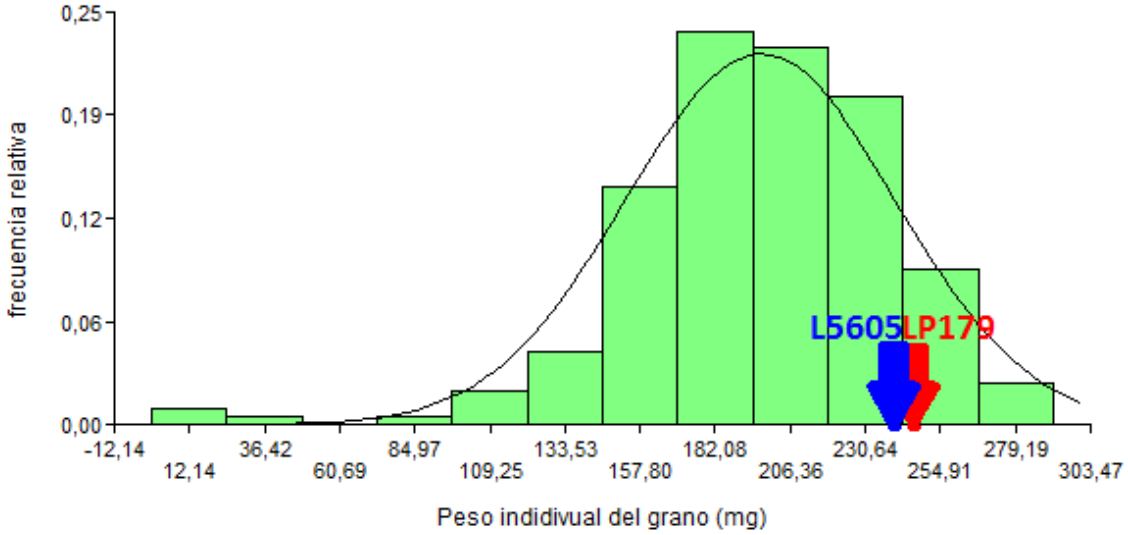

0,25
0,19
0,12
0,06
0,00
frecuencia relativa
LP179
L5605
0,00
0,10
0,19
0,28
0,38
0,47
0,56
0,65
0,75
Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada-1

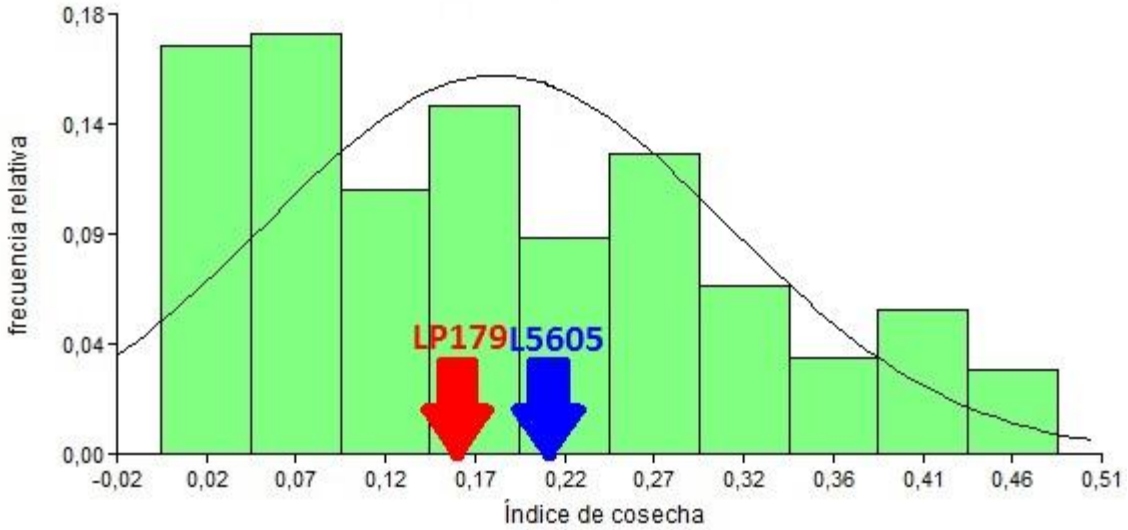

0,27
0,20
0,13
0,07
0,00
frecuencia relativa
L5605
LP179
-0,02
0,06
0,14
0,22
0,30
0,39
0,47
0,55
0,63
Fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada-2


0,27
0,20
0,14
0,07
0,00
frecuencia relativa
L5605
LP179
18,95
34,47
49,98
65,50
81,02
96,54
112,06
127,58
143,09
158,61
Biomasa aérea (g)


0,29
0,22
0,14
0,07
0,00
frecuencia relativa
LP179
L5605
-15,93
23,01
61,96
100,91
139,86
178,81
217,76
256,71
295,65
334,60
Número de granos por planta


0,35
0,26
0,17
0,09
0,00
frecuencia relativa
LP179
L5605
-3,96
3,96
11,88
19,80
27,72
35,65
43,57
51,49
59,41
67,33
75,25
Rendimiento en granos por planta (g)


0,25
0,19
0,12
0,06
0,00
frecuencia relativa
L5605
LP179
-12,14
12,14
36,42
60,69
84,97
109,25
133,53
157,80
182,08
206,36
230,64
254,91
279,19
303,47
Peso indidivual del grano (mg)


0,18
0,14
0,09
0,04
0,00
frecuencia relativa
LP179
L5605
-0,02
0,02
0,07
0,12
0,17
0,22
0,27
0,32
0,36
0,41
0,46
0,51
Índice de cosecha