

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**POTENCIAL DE RENDIMIENTO DE UN AMPLIO RANGO DE GRUPOS DE  
MADUREZ DE SOJA EN DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES DEL  
URUGUAY**

**por**

**Mariana MEDINA LASAGA  
Isabel PEREIRA PORTELA**

**TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2018**

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. Deborah Gaso

-----  
Ing. Agr. Oscar Bentancur

-----  
Ing. Agr. Gonzalo Rizzo

Fecha: 27 de setiembre de 2018

Autores:

-----  
Mariana Lorena Medina Lasaga

-----  
Isabel Pereira Portela

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional y motivación constante durante el transcurso de toda la carrera.

A la tutora Ing. Agr. (MSc.) Deborah Gaso, por confiar en nosotras y darnos la oportunidad de formar parte de este proyecto.

A Ximena Morales y Federico Rodríguez por su ayuda en el trabajo de campo.  
A los Ings. Agrs. Oscar Bentancur y Gonzalo Rizzo por su disposición a participar en el trabajo.

A la Lic. Sully Toledo por la corrección de los aspectos formales de la tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1. <u>CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DE LA SOJA</u> .....	2
2.1.1. <u>Estados de desarrollo en soja</u> .....	2
2.1.1.1. <u>Estados vegetativos</u> .....	4
2.1.1.2. <u>Estados reproductivos</u> .....	5
2.2. <u>FACTORES AMBIENTALES DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO</u> .....	6
2.2.1. <u>Temperatura</u> .....	6
2.2.2. <u>Fotoperíodo</u> .....	8
2.2.3. <u>Disponibilidad hídrica</u> .....	9
2.2.4. <u>Radiación</u> .....	9
2.3. <u>GENERACIÓN DEL RENDIMIENTO</u> .....	10
2.3.1. <u>Número de nudos</u> .....	11
2.3.2. <u>Número de vainas por nudo</u> .....	11
2.3.3. <u>Número de granos por vaina</u> .....	11
2.3.4. <u>Peso de granos</u> .....	11
2.4. <u>PERÍODO CRÍTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO</u> .....	12
2.5. <u>GRUPOS DE MADUREZ</u> .....	12
2.6. <u>IMPORTANCIA DEL AGUA EN SOJA</u> .....	14
2.6.1. <u>Potencial productivo</u> .....	14
2.6.2. <u>Índice de cosecha</u> .....	15
2.6.3. <u>Efecto de déficit hídrico en el rendimiento</u> .....	16
2.6.4. <u>Demanda de agua por el cultivo</u> .....	17
2.6.5. <u>Eficiencia de uso de agua</u> .....	19
2.7. <u>RIEGO</u> .....	19
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	22
3.1. <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y EDÁFICA</u> .....	22
3.2. <u>DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS</u> .....	22
3.2.1. <u>Modelo estadístico</u> .....	22
3.3. <u>MANEJO AGRONÓMICO DE LOS EXPERIMENTOS</u> .....	24
3.4. <u>DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO</u> .....	25
3.5. <u>DETERMINACIONES EN EL CULTIVO</u> .....	26

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	28
4.1. <u>CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL PERÍODO DE CULTIVO</u> ...	28
4.1.1. <u>Radiación solar incidente</u> .....	28
4.1.2. <u>Precipitaciones y evapotranspiración</u> .....	29
4.1.3. <u>Temperaturas</u> .....	30
4.2. <u>DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL CULTIVO</u> .....	33
4.3. <u>DESARROLLO FENOLÓGICO</u> .....	34
4.4. <u>RENDIMIENTO</u> .....	36
4.4.1. <u>Potencial de rendimiento por fecha de siembra</u> .....	36
4.4.2. <u>Potencial de rendimiento para grupo de madurez contrastante</u> .....	37
4.5. <u>CRECIMIENTO DEL CULTIVO</u> .....	40
4.5.1. <u>Evolución del área foliar</u> .....	40
4.5.2. <u>Evolución de la materia seca acumulada</u> .....	42
4.6. <u>COMPONENTES DEL RENDIMIENTO</u> .....	45
4.6.1. <u>Número de grano por metro cuadrado</u> .....	45
4.6.2. <u>Peso de mil granos</u> .....	48
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	52
6. <u>RESUMEN</u> .....	53
7. <u>SUMMARY</u> .....	54
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	55
9. <u>ANEXOS</u> .....	63

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Estadios fenológicos del cultivo de soja según la escala de Fehr y Caviness. ....	4
2. Temperaturas cardinales.....	7
3. Riegos realizados en los experimentos sembrados en octubre y noviembre.....	26
4. Tasas de senescencia foliar ( $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) para los GM 3.8 y 6.8 bajo diferentes fechas de siembra y condición hídrica. ....	41
5. Acumulación de MS ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ) a R5 para los diferentes GM según fecha de siembra.	43

### Figura No.

1. Esquema del ciclo ontogénico del cultivo de soja.. ....	3
2. Componentes del rendimiento en soja.. ....	10
3. Radiación solar incidente ( $cal/cm^2/día$ ) ocurridas durante 2014-2015.....	28
4. Precipitaciones (mm), riego (mm) y evapotranspiración (mm) ocurridas durante 2014-2015 y promedio histórico para la serie 1983-2013 en la localidad de Estanzuela.....	29
5. Temperaturas máximas y mínimas ( $^{\circ}C$ ) ocurridas durante 2014-2015 y promedio histórico para la serie 1983-2013 en la localidad de Estanzuela. ....	30
6. Probabilidad y ocurrencia de días con temperaturas menores a $15^{\circ}C$ , sobre el césped, durante etapas iniciales del cultivo ocurridas en octubre-noviembre de 2014 y la serie histórica 1983-2013 en la localidad de Estanzuela. ....	31
7. Probabilidad y ocurrencia de días con temperaturas mayores a $32^{\circ}C$ durante el período reproductivo del cultivo en la localidad de Estanzuela. ....	32
8. Evolución del agua disponible en el perfil de exploración radicular, según régimen hídrico y fecha de siembra, para los grupos de madurez 3.8 y 5.8. ....	33
9. Duración de las diferentes etapas del ciclo del cultivo para los grupos de madurez sembrados en octubre.....	34
10. Duración de las diferentes etapas del ciclo del cultivo para los grupos de madurez sembrados en noviembre.....	35
11. Rendimiento en grano ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ) para las distintas fechas de siembra según condición hídrica.....	36
12. Rendimiento en grano ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ) y diferencias en rendimiento ( $kg \text{ ha}^{-1}$ ) de los distintos GM según condición hídrica (CH) y fecha de siembra (FS).....	38
13. Evolución de la cobertura del suelo (IAF) para dos grupos de madurez contrastante 3.8 y 5.8 bajo diferentes condiciones hídricas y fecha de siembra.. ....	40

14. Acumulación de materia seca a R1, R3 y R5 para los diferentes grupos de madurez evaluados bajo riego y secano en las diferentes fechas de siembra.....	42
15. No. de granos m <sup>-2</sup> para las distintas fechas de siembra según condición hídrica. ....	45
16. No. de granos m <sup>-2</sup> y diferencias de este en los distintos GM según condición hídrica (CH) y fecha de siembra (FS). ....	46
17. Relación entre rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ) y NG m <sup>-2</sup> . ....	47
18. Peso de mil granos (gramos) para las distintas fechas de siembra según condición hídrica.....	48
19. Peso de mil granos (gramos) y diferencias de este en los distintos grupos de madurez según condición hídrica (CH) y fecha de siembra (FS).. ....	49
20. Relación entre rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ) y PMG. ....	50

## 1. INTRODUCCIÓN

En los comienzos del siglo XXI, al igual que en otros países del Mercosur se comienza a dar en Uruguay un fuerte proceso de expansión de la agricultura, impulsado principalmente por el crecimiento del área de soja. Son diversas las causas que generan este fenómeno, destacándose como las principales: la generalización del uso de los cultivos transgénicos y la siembra directa, las medidas de política económica en Argentina, la estandarización de labores que incrementan la competitividad (Arbeletche y Gutiérrez, 2010). Dicho proceso permite que el área de siembra se incremente ininterrumpidamente desde la zafra 2001/2002, alcanzando las 1.499 mil hectáreas de cultivos de verano en la zafra 2014/2015. El área de siembra de soja fue de 1.334 mil hectáreas en el año agrícola 2014/2015, lo cual conformó el 89% del área de verano y su producción fue estimada en 3,1 millones de toneladas, siendo inferior a las dos cosechas inmediatas anteriores. El rendimiento medio del cultivo a nivel nacional fue estimado en 2331 kg ha<sup>-1</sup> en el año 2014/2015, lo que implica una disminución del orden del 3% respecto al rendimiento promedio de la zafra anterior y del 12% respecto a la zafra 2012/2013. El máximo histórico de rendimiento se logró en el año 2012/2013, donde alcanzó 2634 kg ha<sup>-1</sup> (MGAP. DIEA, 2015).

La productividad del cultivo de soja en Uruguay se ha mantenido estable durante la última década, oscilando en niveles bajos de productividad, que son variables según las condiciones ambientales del año. Para Uruguay, existe una brecha en la producción entre el rendimiento alcanzable del cultivo y el obtenido a nivel comercial. De esta forma, conocer cuáles son los factores que limitan al rendimiento y en que magnitud lo afectan son aspectos fundamentales para disminuir la brecha de producción existente.

Boyer, citado por Giménez y García (2011) sostiene que en los cultivos agrícolas se presentan un conjunto de limitantes para la obtención de los rendimientos potenciales, pero el principal factor en causar pérdidas en los rendimientos en los cultivos de verano realizados en secano son las deficiencias hídricas. De esta forma la ocurrencia de períodos de déficit hídrico más o menos prolongados constituye una causa fundamental que explica la variabilidad interanual en los rendimientos de los cultivos. De esta manera, el riego suplementario puede ser una excelente estrategia para aumentar los rendimientos y mejorar la estabilidad de estos.

La optimización de las prácticas de manejo agronómico como los son la fecha de siembra y la selección del grupo de madurez son aspectos relevantes para maximizar los rendimientos y el retorno económico en los sistemas agrícolas con riego. Por este motivo el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de crecimiento y rendimiento del cultivo de grupos de madurez contrastantes en diferentes ambientes productivos dados por las fechas de siembra y condición hídrica.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DE LA SOJA

La temperatura y el fotoperíodo son los factores ambientales que regulan la duración de las fases de desarrollo del cultivo, actuando en forma simultánea en las plantas y con evidencia de interacción entre ellos (Kantolic et al., 2003b). Por lo tanto, la duración de las fases fenológicas dependerá de los factores ambientales temperatura y fotoperíodo y de la interacción entre ellos. La variación interanual en las fases de desarrollo está asociada a las variaciones de la temperatura, dado que el fotoperíodo es constante para un mismo sitio y fecha de siembra (FS). La respuesta a la temperatura y al fotoperíodo depende del genotipo (Kantolic et al., 2003b). Por lo cual la siembra debe realizarse en una época tal que la ocurrencia del período crítico coincida con condiciones ambientales favorables. Para ajustar dicho momento el productor cuenta con dos elementos claves: el ciclo de la variedad y la época de siembra (Andrade y Cirilo, 2000b).

#### 2.1.1. Estados de desarrollo en soja

La escala desarrollada por Fehr y Caviness (1977), es la más utilizada para la descripción de los estadios fenológicos del cultivo de soja, donde a su vez se emplean dos escalas, una para los estados vegetativos (V) y la otra para los reproductivos (R). Los dos primeros estados vegetativos se los identifican con letras, VE (emergencia) y VC (cotiledonar). En los estados vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas, mientras que los estados reproductivos se basan en la floración, el desarrollo de vainas, el desarrollo de los granos y la maduración (Kantolic et al., 2003b). En la Figura 1 se representa en forma esquemática el transcurso de los estadios fenológicos en el cultivo. Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo (sitio, fecha de siembra, densidad), ya que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50 % de las plantas del cultivo (Kantolic et al., 2003b). El Cuadro 1 describe detalladamente cada uno de los estadios fenológicos.

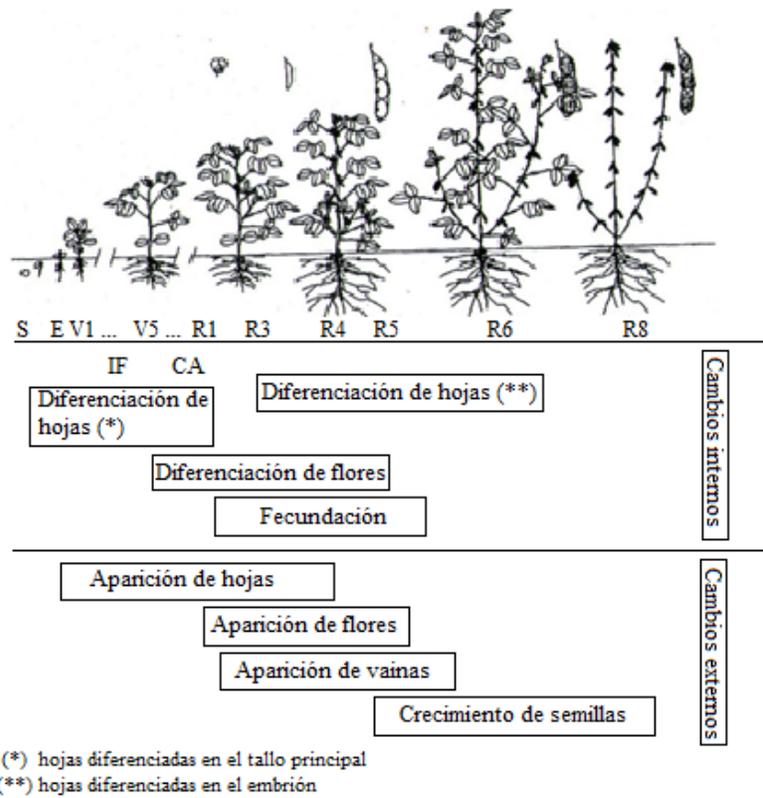


Figura 1. Esquema del ciclo ontogénico del cultivo de soja.  
Fuente: Kantolic et al. (2003b).

Cuadro 1. Estadios fenológicos del cultivo de soja según la escala de Fehr y Caviness.

Estados vegetativos			Estados reproductivos		
Estados	Denominación	Descripción	Estado	Denominación	Descripción
VE	Emergencia	Cotiledones sobre la superficie del suelo.	R1	Comienzo de floración	Una flor abierta en cualquier nudo del tallo principal.
VC	Cotiledonar	Los bordes de las hojas unifoliadas no se tocan; cotiledones desplegados.	R2	Plena floración	Una flor abierta en alguno de los dos nudos superiores del tallo principal con una hoja totalmente desarrollada.
V1	Un nudo	Hojas unifoliadas desarrolladas; en la primera hoja trifoliada los bordes de los folíolos no se tocan.	R3	Comienzo de fructificación	Una vaina de 5mm de largo en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal con una hoja totalmente desarrollada.
V2	Dos nudos	Primera hoja trifoliada totalmente desarrollada.	R4	Plena fructificación	Una vaina de 2 cm de largo en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal con una hoja totalmente desarrollada. La cavidad de la vaina en la que desarrollará cada semilla se encuentra recubierta por una membrana blanca.
V3	Tres nudos	Hojas unifoliadas y dos trifoliadas totalmente desarrolladas.	R5	Comienzo de llenado de granos	Semilla de 3 mm de largo en una vaina en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal con una hoja totalmente desarrollada.
			R6	Máximo tamaño de semillas	Una vaina contiene una semilla que ocupa toda la cavidad, en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal.
Vn	n nudos	n nudos con hojas totalmente desarrolladas.	R7	Comienzo de madurez	Una vaina normal ubicada en el tallo principal ha alcanzado su color típico de madurez.
			R8	Plena madurez	Un 95% de las vainas han alcanzado su color típico de madurez.

Fuente: Kantolic et al. (2003b).

#### 2.1.1.1. Estados vegetativos

Según Kantolic et al. (2003b), la fase germinación-emergencia es una de las más críticas. Aun cuando las condiciones térmicas sean favorables, la humedad del suelo resulta clave en definir el establecimiento de las plántulas, a través de su efecto directo sobre la imbibición y el crecimiento de las plántulas e indirectamente, a través de sus interacciones con el oxígeno del suelo, la temperatura, la profundidad de siembra o el estado de la superficie del suelo.

Bajo condiciones ambientales adecuadas, la germinación comienza cuando la semilla ha absorbido el 50% de su peso en agua. En primer lugar, la raíz primaria se elonga e incrementa su grosor, luego el hipocótilo se extiende dirigiéndose hacia la superficie del suelo y empuja los cotiledones y el epicótilo. Las raíces laterales comienzan a crecer desde la raíz principal y finalmente, los cotiledones emergen alcanzando el estadio VE. Luego, la emergencia y el despliegue de hojas unifoliadas

indican el inicio del estado VC, cuando el meristema apical queda expuesto. Posteriormente aparecen las hojas trifoliadas, sucediéndose los estadios Vn (Sadras et al., 2000).

En soja, el cambio del estado vegetativo al reproductivo es más gradual y coexisten en el tiempo meristemas vegetativos y reproductivos. En esta especie hay variedades determinadas, semideterminadas e indeterminadas (Bernard, 1972), pero en todas ellas el primer signo de entrada al período reproductivo es el cambio de estado de un meristema axilar mientras que el ápice permanece vegetativo durante un período más o menos prolongado; esto hace que en una misma planta se diferencien simultáneamente hojas y órganos reproductivos.

#### 2.1.1.2. Estados reproductivos

Kantolic et al. (2003b) indican que la transición interna del estado vegetativo al reproductivo incluye dos eventos importantes: primero, la iniciación floral, que se observa en un meristema axilar del tallo principal y, segundo, la transformación del ápice a la condición reproductiva. Los mismos autores indican que dentro del tallo principal, la diferenciación comienza en un nudo ubicado en una posición intermedia del tallo principal y progresa hacia las yemas axilares de los nudos superiores e inferiores. Sadras et al. (2000) mantienen que la floración (R1) comienza en una porción intermedia de la planta, por lo general entre el tercer y sexto nudo del tallo principal, y desde allí progresa hacia la parte superior e inferior del mismo; unos días más tarde florecen las ramificaciones. Dentro de cada nudo, la floración en los racimos comienza en la base y progresa acrópetamente. La aparición de hojas continúa por varios días luego de R1; esta superposición entre aparición de flores y hojas es más pronunciada en genotipos indeterminados y bajo condiciones de día largo. La fase de floración puede durar varias semanas, en un mismo momento e incluso en un mismo nudo pueden encontrarse flores recientemente abiertas, flores ya marchitas y vainas en crecimiento (Kantolic et al., 2003b).

Luego de la fecundación, que ocurre generalmente el mismo día o el anterior a la apertura de la flor, comienza el desarrollo de la vaina. La longitud y el ancho máximo de la vaina se alcanzan pocos días después de floración y en este momento las semillas solo tienen un 4 % de su peso máximo; el peso de las vainas continuará incrementándose durante parte del crecimiento de los granos (Kantolic et al., 2003b). Sadras et al. (2000) determinan que el estadio R3 es alcanzado cuando alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal con una hoja completamente desarrollada sostiene una vaina de 5mm de longitud. R4 se inicia cuando la planta posee una vaina de 20mm de longitud en alguno de los cuatro nudos superiores sobre el tallo principal con una hoja completamente desarrollada (Sadras et al., 2000). El estado R5 se alcanza cuando una vaina situada en alguno de los cuatro nudos superiores del tallo principal posee una

semilla de 3 mm de longitud. Las semillas que han superado su etapa de división celular entran en una fase de alta tasa de acumulación de materia seca. Alrededor de R5.5 la planta alcanza su máxima altura, área foliar y número de nudos (Sadras et al., 2000).

Una vez que las vainas han alcanzado su máxima longitud comienza a hacerse evidente el crecimiento de los granos. A lo largo del período de llenado los granos aumentan de tamaño, ocupando progresivamente cada lóculo de la vaina. En el estado R6, en las vainas de los nudos superiores los granos tienen un diámetro igual al de la cavidad de la vaina; las vainas maximizan su peso seco mientras que resta menos de un 20 % del crecimiento de los granos (Kantolic et al., 2003b). La tasa de crecimiento y de acumulación de nutrientes en la planta y de las semillas mantiene un valor elevado hasta luego de R6 y de R6.5 respectivamente, estados en que comienzan a disminuir (Sadras et al., 2000).

El estado R7 corresponde a la madurez fisiológica de las primeras vainas, es decir, máximo de materia seca en las semillas y la pérdida de su coloración verde, mientras que R8 corresponde a plena madurez. El amarillamiento foliar comienza normalmente después de R6 y continúa hasta R8, cuando la mayoría de las hojas han caído de la planta (Sadras et al., 2000). La semilla recién formada contiene un 90 % de humedad, a medida que se acumula materia seca en el grano y aumenta el tamaño de la semilla, el porcentaje de agua disminuye a una tasa constante hasta alcanzar un 60 % de agua cuando se alcanzó el 90 % del tamaño de la semilla. En el momento de madurez fisiológica las semillas tienen cerca de un 55 % de agua y luego el contenido de humedad declina rápidamente al 10-15 % (Kantolic et al., 2003b).

## 2.2. FACTORES AMBIENTALES DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO

La radiación solar y la temperatura, junto con el agua, son las principales variables agrometeorológicas que regulan los procesos metabólicos de las plantas (Cárcova et al., 2003).

### 2.2.1. Temperatura

La temperatura regula el desarrollo durante todo el ciclo, sin respuestas diferenciadas entre genotipos, es decir que habría una respuesta universal a la temperatura por parte de todos los grupos de madurez (GM); sin embargo, los requerimientos de tiempos térmicos para que se produzca la floración tienden a disminuir desde los GM mayores hacia los GM menores (Piper et al., 1996). La temperatura tiene marcados efectos sobre la tasa de desarrollo en las fases vegetativas del cultivo. Según los experimentos descritos en la literatura el desarrollo vegetativo, caracterizados a través de la tasa de formación de nudos, se acelera linealmente con temperaturas entre 8 y 30°C (Jones et al., 1991).

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo, pero los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo de las fases de desarrollo (Kantolic et al., 2003b). Farías et al. (2007) indicaron, la soja se adapta mejor a regiones donde las temperaturas oscilan entre 20° y 30°C siendo que la temperatura ideal para su desarrollo está en torno de 30°C. Para que se cumpla la fase germinación-emergencia se han calculado temperaturas bases (Tb) entre 6 y 9 °C, temperaturas óptimas entre 25 y 30°C y una máxima de 40°C (Kantolic et al., 2003b). Si bien las temperaturas base para la germinación están en torno a 6-9°C, por debajo de los 15°C la germinación y elongación decrece sustancialmente, desde valores de 99% hasta valores menores de 70% (Bramlage et al., 1978). La temperatura del suelo es un factor esencial para alcanzar una implantación exitosa del cultivo. Kantolic et al. (2003b), indican que el tiempo térmico requerido para que se cumpla la fase siembra-emergencia se ha estimado entre 120 y 200 °C día<sup>-1</sup> (Tb= 6 °C), para condiciones de buena y regular provisión hídrica, respectivamente. Setiyono et al. (2007) realizaron una recopilación de las temperaturas cardinales para los diferentes estadios de soja, las cuales fueron reportadas por diferentes autores. En el Cuadro 2 se presentan las temperaturas cardinales para los diferentes estadios fenológicos.

Cuadro 2. Temperaturas cardinales.

<b>Fase</b>	<b>T mín. (°C)</b>	<b>T op. (°C)</b>	<b>T máx. (°C)</b>
Emergencia- V1	5.0 A	31.5 A	45.0 A
Emergencia- Vo	5.0 A	31.5 A	45.0 A
V1-Vn	7.6 E	31.0 A	40.0 E
Vo-Ro	—	—	—
Ro-R1	7.0 A	32.4 A	41.9 A
R1-R5	3.6 E	25.0 B	40.0 E
R1-R3.5	3.6 E	25.0 B	40.0 E
R1-VΔ	3.6 E	25.0 B	40.0 E
R1-R7	0.0 E	21.5 E	38.7 E

\*Vo: estado cotiledonar; V1: hoja unifoliada; Vn: n nudos en tallo principal; Ro: fin de inducción floral; R1: una flor abierta; R5: comienzo de llenado de grano; R7: madurez fisiológica; VΔ: comienzo de reducción de aparición de nudos en tallo principal; A. Hesketh et al. (1973), B. Brown y Chapman (1960), E. Field data (2004).

Fuente: adaptado de Setiyono et al. (2007).

Board y Kahlon (2011) señalaron que el estrés térmico en la soja se manifiesta a través de los efectos sobre la fotosíntesis y la tasa de crecimiento de los cultivos, anomalías reproductivas, y los eventos fenológicos. Entre estos factores, el efecto sobre la fotosíntesis y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) tiene el mayor efecto

sobre el rendimiento. Las temperaturas superiores a 35° C pueden inhibir la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico. Sin embargo, ya que se produce dehiscencia de las anteras de 8 a 10 a.m., las temperaturas en la mayoría de las zonas de cultivo de soja no estarían por encima del nivel crítico durante estos eventos.

Gibson y Mullen (1996) encontraron que un régimen térmico de 35°C durante el día y entre 20°C y 30°C durante la noche aplicado desde R1 a R5 provocó disminuciones del rendimiento cercanas al 16%. Heinemann et al. (2006) encontraron reducciones en el rendimiento del orden del 35% con temperaturas medias diarias de 27,5 °C con respecto al control de 17,5 °C; siendo el 88% de la variación en rendimiento explicada por diferencias en el número de granos entre tratamientos. Por otra parte, Thomas y Raper (1978) reportaron reducciones en el número de vainas a partir de 22 °C de temperatura media diaria.

De igual manera, Molino (2011), generando episodios de altas temperaturas durante el estado fenológico R4, determinó que, a madurez fisiológica, la biomasa total por planta fue reducida significativamente por estrés térmico. Asimismo, la exposición del cultivo a altas temperaturas provocó un incremento del porcentaje de aborto de vainas, reduciendo significativamente el número de granos, no registrándose efectos significativos sobre el componente peso de granos. La combinación de altas temperaturas y secano no solo impactó sobre la acumulación de biomasa total, sino también sobre la partición reproductiva, provocando caídas en el rendimiento final.

### 2.2.2. Fotoperíodo

Kantolic et al. (2003b) indican que el fotoperíodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos: la iniciación floral, la floración, la fructificación y el llenado de los granos, condicionando el momento en que comienzan y finalizan las diferentes fases y la tasa con que progresan los cambios dentro de las plantas.

La existencia de una fase “juvenil”, en la cual las plantas no responden al fotoperíodo, merece destacarse como uno de los aspectos fundamentales de la respuesta fotoperiódica. Al finalizar la fase juvenil, las plantas entran en una fase “inductiva” en la cual la iniciación del estado reproductivo se adelanta o se retrasa de acuerdo a las condiciones fotoperiódicas durante esta fase (Sadras et al., 2000).

Kantolic y Satorre (2004) determinan que el efecto principal del fotoperíodo es el de inducir la floración. En términos generales la soja se clasifica como planta de días cortos, es decir que a medida que los días se acortan, el inicio de la floración se adelanta, por lo tanto, la etapa vegetativa se reduce.

La duración del ciclo está controlada por la acumulación térmica y por el fotoperíodo, la sensibilidad a cada factor depende del GM. Los GMs cortos, como el IV, presentan baja sensibilidad al fotoperíodo, la acumulación de temperaturas es el factor de mayor importancia en la inducción floral y por ende en la duración del ciclo (Hadley et al., 1984). En cambio, en soja de GM mayores a VI la duración del ciclo está afectada fundamentalmente por el fotoperíodo (Major et al., 1975).

### 2.2.3. Disponibilidad hídrica

El consumo de agua de un cultivo es el valor de la evapotranspiración (ETc) acumulada a lo largo de su ciclo. Para la región sojera núcleo de Argentina las necesidades de agua del cultivo de soja de primera y segunda época de siembra varían de 500 a 600 mm y de 400 a 500 mm, respectivamente (Bodrero, 2003). De Melo et al. (2011) indican que el rendimiento de soja aumenta con precipitaciones crecientes, volviéndose asintótica por encima de 700 mm. Numerosos trabajos coinciden señalar que el período reproductivo es el más sensible a la falta de agua (Andriani et al., 1991). La mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura en el país presentan una capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) que varía entre 80 y 160 mm (Molfino y Califra, 2001). En las mejores situaciones, la CAAD de los suelos cubre aproximadamente la tercera parte de las ETc estimadas para los cultivos de verano en la región (DellaMaggiore et al., 2000). Dada la escasa CAAD de los suelos es notoria, la elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos y en secano, las recargas provienen fundamentalmente de las precipitaciones (Giménez y García, 2011).

Según Salvagiotti (2009) la productividad de los cultivos está ligada a las variaciones en la ocurrencia de precipitaciones y a la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Por lo tanto, el manejo del agua en los diferentes sistemas de producción será el factor principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas de producción en soja.

### 2.2.4. Radiación

La tasa de crecimiento de un cultivo (TC: biomasa acumulada por unidad de tiempo) resulta del balance de dos procesos contrapuestos: la fotosíntesis (ganancia de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>) y la respiración (pérdida de CO<sub>2</sub>). Debido a que la fracción de carbono fijado que se destina a respiración es relativamente constante, aumentos en la radiación interceptada por el cultivo se traducen en aumentos en la tasa de crecimiento. La radiación interceptada por un cultivo es el resultado de la eficiencia con que la radiación incidente es interceptada por el canopeo (Cárcova et al., 2003).

De esta manera, Bodrero (2003) establece que la TC del cultivo aumenta a medida que aumenta el índice de área foliar (IAF) hasta que alcanza un valor capaz de interceptar el 95 % de la radiación solar incidente. Al valor mínimo de IAF con el cual se intercepta el 95 % de la radiación, se lo denomina IAF crítico. La soja alcanza el 95 % de la intercepción de la radiación con un IAF de entre 3.1 y 4.5; dependiendo de la arquitectura de las plantas, densidad de siembra y espaciamiento.

### 2.3. GENERACIÓN DEL RENDIMIENTO

Como en todos los cultivos para grano, el rendimiento del cultivo de soja resulta del producto de dos componentes numéricos principales que no son plenamente independientes entre sí: el número de granos que se establece por unidad de área y el peso unitario que alcanzan. El número de granos (NG) puede subdividirse, a su vez, en varios subcomponentes. Estos subcomponentes representan la cantidad de sitios potenciales para el establecimiento de los granos (número de nudos por unidad de área del cultivo), la fertilidad de estos sitios (número de vainas por nudos) y la fertilidad de los frutos (número de granos por vaina, Kantolic et al., 2003b). En la Figura 2 se representa el rendimiento desglosado en cada uno de sus componentes numéricos.

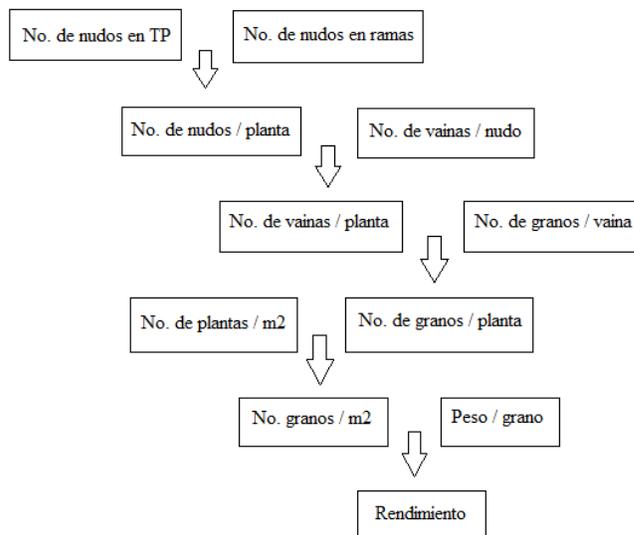


Figura 2. Componentes del rendimiento en soja.

Fuente: Kantolic et al. (2003b).

Si bien existen compensaciones entre estos componentes, guardan una cierta independencia que permite suponer, que un aumento en cualquiera de los dos puede producir un aumento en el rendimiento. Sin embargo, en un rango amplio de condiciones

agronómicas, el número de granos por unidad de superficie es el componente que mejor explica las variaciones en el rendimiento (Kantolic, 2003a). El componente número de granos se puede dividir en tres subcomponentes: número de nudos, número de vainas por nudo y número de granos por vaina.

#### 2.3.1. Número de nudos

La aparición de nudos en el tallo principal comienza en emergencia y progresa hasta bastante más allá de la floración, sobre todo en genotipos indeterminados. El crecimiento de las ramificaciones comienza generalmente cerca de floración y continúa durante gran parte del período reproductivo, por lo que la máxima expresión del número de nudos del cultivo depende en gran medida de las condiciones ambientales que prevalezcan luego de la floración (Kantolic, 2003a).

#### 2.3.2. Número de vainas por nudo

El número de vainas por nudo es el resultado de los fenómenos de generación y mortandad de los frutos. La generación incluye la iniciación de primordios florales, su posterior desarrollo y crecimiento hasta su transformación en estructuras florales maduras, la fecundación y el cuajado. La soja, como la mayoría de las angiospermas, produce muchos más primordios florales de los que puede fijar: cada racimo puede tener hasta 30 flores pero menos del 50% llegan a producir vainas, aún bajo condiciones ambientales favorables. Dentro de un nudo, las inflorescencias secundarias y las flores ubicadas en las posiciones distales de los racimos son las más proclives al aborto. La ocurrencia de deficiencias hídricas o cualquier otro estrés que comprometa la fotosíntesis reduce el número de vainas por nudo. Asimismo, la ocurrencia de temperaturas inferiores a 21°C reduce el establecimiento de vainas y por debajo de 14°C no hay fijación de frutos (Kantolic, 2003a).

#### 2.3.3. Número de granos por vaina

Uno o más de los granos de la vaina pueden abortar antes de ingresar en su fase de llenado efectivo, modificando el número de granos logrado por vaina. El aborto de los granos es mucho menor que el de las vainas y, de manera general, no tiene una magnitud tal que deprima significativamente el rendimiento, salvo cuando es consecuencia de ataques intensos de plagas o enfermedades que directamente afectan su supervivencia (Kantolic, 2003a).

#### 2.3.4. Peso de granos

El peso de los granos comienza a aumentar sostenidamente alrededor de 10 días luego de la fecundación, cuando la vaina ha alcanzado su máxima longitud. En el

cultivo, los granos aumentan su peso desde antes de R5 hasta madurez fisiológica. A medida que se acumula materia seca en el grano, el porcentaje de agua disminuye a una tasa constante hasta alcanzar un 60% cuando se alcanzó el 90% del tamaño de la semilla (Kantolic, 2003a).

Andrade y Ferreiro (1996) aseguran que cambios en la provisión de asimilados durante el período de crecimiento de las semillas afectan la tasa y pueden afectar también la duración del período de llenado. Kantolic et al. (2003b) indican que la tasa de crecimiento del grano es sensible a cambios en los factores ambientales, y se maximiza cuando la temperatura se encuentra alrededor de los 23,5°C, mientras que los fotoperíodos largos tienden a reducir el ritmo con el que crecen los granos. Gran parte de las variaciones ambientales en el tamaño de la semilla, se asocian a cambios en la duración del período efectivo de llenado.

#### 2.4. PERÍODO CRÍTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

No todo el ciclo resulta igualmente crítico para definir el rendimiento. Generalmente, condiciones ambientales adversa durante las etapas tempranas del cultivo pueden ser compensadas si mejora la calidad del ambiente y no se afecta el número final de granos. La posibilidad de que aparezcan hojas luego del comienzo de floración, la gran cantidad de sitios potenciales donde se diferencian flores y la extensión del período de floración son todas características que le otorgan al cultivo una considerable tolerancia a condiciones adversas durante prefloración. Sin embargo a medida que avanza el ciclo esta tolerancia disminuye (Kantolic et al., 2003b).

Sadras et al. (2000), indican que el período más crítico del desarrollo en términos de la determinación del rendimiento se inicia alrededor de R3-R4 y se extiende hasta R6. El subperíodo comprendido entre R4.5 y R5.5 es especialmente crítico pues la floración se completa y las vainas y las semillas pequeñas pueden abortar bajo condiciones ambientales no adecuadas. Situaciones desfavorables durante el período comprendido entre R6 y R6.5 pueden acortar el período de llenado y disminuir el peso de las semillas afectando el rendimiento. Por el contrario, condiciones adversas entre R6.5 y R7 producen efectos de menor magnitud pues las semillas ya han acumulado una gran proporción de su peso seco total.

#### 2.5. GRUPOS DE MADUREZ

La variabilidad entre genotipos en términos de respuesta térmica y fotoperiódica, se traduce en diferentes duraciones de ciclo total para cada sitio y fecha de siembra (De la Vega y De la Fuente, 2003). Generalmente se agrupa a los genotipos según su ciclo en cultivares de ciclo corto, intermedio y largo, considerando su duración para las fechas de siembra más comúnmente utilizadas en un ambiente dado. En

particular, dentro de los cultivares comerciales de soja, existe un rango muy amplio en la duración del ciclo, y por esta razón se agrupan en GM o de precocidad. Este agrupamiento se basa en la duración de la etapa siembra-floración (S-R1), y refleja la respuesta de los cultivares a la temperatura y fotoperíodo combinados. Para las condiciones de Uruguay, en fechas de siembra habituales y en iguales condiciones ambientales, la duración de la etapa S-R1 es más larga cuanto mayor es el número del GM.

Los cultivos se deben manejar de forma tal que los períodos más críticos para la determinación del rendimiento ocurran en momentos con condiciones favorables para el crecimiento. Los productores cuentan con dos elementos claves para ajustar la ocurrencia de dichos períodos críticos a cada ambiente: el ciclo del cultivar y la fecha de siembra (Andrade y Cirilo, 2000b).

El fotoperíodo y la temperatura varían con la ubicación geográfica (latitud) y con la época del año (FS) generando una compleja interacción genotipo-ambiente que torna difícil la predicción de las etapas fenológicas del cultivo. La posibilidad de predecir la fecha de ocurrencia de las distintas etapas del cultivo de soja resulta de gran interés para la toma de decisiones en el manejo de éste (Peltzer y Peltzer, 2013). La correcta combinación del grupo de madurez con fecha de siembra constituye el aspecto fundamental a considerar en la planificación del cultivo (Andrade y Cirilo, 2000b).

Variaciones en la fecha de siembra modifican la duración del ciclo para todos los grupos de madurez. Un retraso en la fecha de siembra para un grupo de madurez dado acorta el ciclo del cultivo, debido a una menor duración de la fase emergencia-R1 y R1-R7, pero el acortamiento de la segunda fase es proporcionalmente mayor que la primera. En términos generales, una menor duración del ciclo disminuye la cantidad de radiación interceptada por el cultivo, afectando la producción de biomasa, y, por lo tanto, el rendimiento. Por otra parte, la distinta sensibilidad al fotoperíodo de los GMs determina que la duración del ciclo, la producción de biomasa y el rendimiento difieran entre grupos para una misma fecha de siembra (Kantolic et al., 2003b). El atraso en la fecha de siembra a partir de mediados de noviembre produce disminuciones en los rendimientos (Andrade y Cirilo, 2000b). Esto se debe a la menor radiación interceptada total como consecuencia del acortamiento de la etapa reproductiva y el fotoperíodo más corto cuando la siembra se retrasa (Andrade y Cirilo, 2000b).

En Uruguay a partir del año 2001, en forma conjunta con la expansión del área agrícola y del cultivo de soja, se introdujo un rango amplio de GMs (desde GM III al VII) al área comercial y se inició investigación sobre el desempeño de dichos genotipos en una diversidad de ambientes (Ceretta y Vilaró, 2003). Ceretta y Mandl (2002), identificaron a las variedades de ciclo corto (GM III y IV) como de alto potencial y baja estabilidad de rendimientos. Este comportamiento se puede deber a que en los GMs III y

IV en fecha de siembra normales de fines de octubre, la ubicación temporal del período crítico (PC) permite obtener condiciones de radiación solar y temperaturas para lograr elevados rendimientos, en ausencia de limitaciones hídricas. En secano, el rendimiento alcanzado se vincula al estado hídrico del cultivo durante el PC, por tanto, los rendimientos potenciales se concretan sólo en los años en que las precipitaciones permiten cubrir las necesidades hídricas.

Giménez (2007) en ensayos realizados entre 2003 y 2005 determinó que en el caso de la localidad de Dolores en la fecha de siembra de octubre se observa que los GMs III y IV presentaron el PC durante los meses de enero y febrero. Considera importante destacar que en el GM III una parte importante del PC transcurre durante enero, en dicho mes se producen las mayores demandas evaporativas atmosféricas. Así mismo en Dolores en los GMs V a VIII en fecha de siembra de octubre, se verificó la ocurrencia del PC durante los meses de febrero y marzo, en los que en general, se presentan menores demandas atmosféricas, radiación solar y temperaturas que en el mes de enero. En fecha de siembra de noviembre los GMs III y IV presentaron la mayor parte del PC durante febrero, los GMs V y VI entre febrero y marzo, mientras que los GMs VII y VIII, ubicaron el PC principalmente durante marzo. En la fecha de siembra de diciembre, se observó que en los GMs III y IV la ubicación del PC fue en los meses de febrero y marzo, mientras que en los GMs V a VII el PC se localizó principalmente en marzo y en el GM VIII el PC durante marzo e inicios de abril.

El momento de ocurrencia de los estadios fenológicos depende del GM, del ambiente y de la interacción entre ambos. En un mismo cultivar, a medida que se atrasa la fecha de siembra, desde una fecha normal -1o. de noviembre-, aumenta la temperatura y se acelera el crecimiento y desarrollo. Asimismo, fechas de siembra muy tardías hacen coincidir la etapa de llenado de grano con temperatura y radiación menor. El atraso en la fecha de siembra acorta la duración en días del ciclo del cultivo y el período crítico de llenado de grano ocurre en momentos de menor oferta ambiental (Belloso, 2003).

## 2.6. IMPORTANCIA DEL AGUA EN SOJA

### 2.6.1. Potencial productivo

El rendimiento potencial (RP) es el mayor rendimiento que se puede obtener en un ambiente de producción con determinado genotipo. Se encuentra determinado por factores no modificables del ambiente como la radiación solar, las temperaturas y los suelos. Así como por factores de manejo modificables como el arreglo espacial y la fecha de siembra. Se determina en ausencia de factores limitantes como la disponibilidad de agua, nutrientes y de factores reductores del rendimiento como los daños causados por plagas, malezas y enfermedades (Giménez, 2012). El rendimiento máximo alcanzable en secano (RAs) es aquel logrado por un cultivo que crece sin limitantes nutricionales y utilizando la mejor combinación de insumos y tecnología pero a merced

de las precipitaciones de la zona (Lobell et al., 2009). La brecha entre RP y RAs puede ser reducida mediante estrategias de manejo que hagan un uso más eficiente del agua (Cassman, 1999).

La estimación del rendimiento potencial de soja en Uruguay con el modelo SoySim, para una serie entre 1980 a 2012 en las condiciones de INIA La Estanzuela fue de 6000 kg ha<sup>-1</sup> para GM III y IV (Berger y Gaso, 2013). Por otra parte, Bidegain (2012) estimó rendimientos potenciales del cultivo de soja entre un rango de 4138 a 8329 kg ha<sup>-1</sup>, con un promedio de 6164 kg ha<sup>-1</sup> utilizando el modelo CROPSYST para los años comprendidos entre 2004 y 2011 en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Paysandú. La variación en los rendimientos potenciales entre años se debe a la variabilidad en la radiación solar acumulada durante todo el ciclo del cultivo, de esta forma los años con mayores períodos de nubosidad y menor radiación incidente serán los de menores rendimientos potenciales.

Las evidencias experimentales de los últimos años indican que el rendimiento potencial del cultivo en Uruguay estaría en torno a 6000 kg ha<sup>-1</sup>, con alta variabilidad entre los años. Giménez (2012) determinó que el rendimiento potencial de soja en la zona oeste de Uruguay fue de 4885 y 7275 kg ha<sup>-1</sup> para los años 2009 y 2011 respectivamente. Esto fue debido a que en el año 2009 ocurrieron excesos de precipitaciones y como consecuencia baja radiación solar incidente, la cual afectó la producción de biomasa, traduciéndose en una disminución en el número de granos por metro cuadrado y en el rendimiento.

Sawchik y Ceretta (2005) aseguran que la disponibilidad de agua es quizás la principal limitante de producción de los cultivos estivales en las condiciones locales. Así la ocurrencia de períodos de déficit hídrico más o menos prolongados constituye una causa fundamental que explica la variabilidad interanual en los rendimientos de los cultivos. La magnitud de estas deficiencias está además estrechamente relacionada con la capacidad de almacenaje de agua de los suelos y el volumen explorado por las raíces de los cultivos. Existen diversos factores que afectan la capacidad de almacenaje de agua de los suelos, pero pueden sintetizarse en dos grandes grupos: por un lado aquellos relacionados con la génesis del suelo, como la textura o la profundidad del perfil y por otro lado factores de manejo que afectan la capacidad de recarga de agua de los suelos como la época de siembra, la duración del período de barbecho, el cultivo antecesor, el estado estructural de los suelos, entre otros.

#### 2.6.2. Índice de cosecha

El índice de cosecha (IC) refleja la partición de fotoasimilados hacia los órganos. Se lo define usualmente como la proporción del peso seco total que se acumula en los órganos cosechados (Cárcova et al., 2003). Baigorri (2004), determinó que en

situaciones con disponibilidad hídrica no limitante, el rendimiento depende de la cantidad de biomasa vegetativa producida y del IC del cultivar. Este mismo autor agrega que los cultivares de ciclo más corto tienen IC mayores que los de ciclo más largo. En fechas de siembra tempranas, el IC de los ciclos cortos es de 50 a 60% mientras que en los ciclos largos es de 40 a 50%. Para una fecha de siembra determinada, el IC presenta generalmente una relación inversa con la longitud del ciclo de los cultivares. Por otra parte, el atraso de la fecha de siembra reduce el IC, principalmente en los cultivares de ciclo largo.

### 2.6.3. Efecto de déficit hídrico en el rendimiento

Andrade y Sadras (2000a) señalan el término “sequía” como período seco prolongado. La sequía puede ser causada por: a) escasez de agua disponible para las plantas, la cual a su vez puede resultar de lluvias escasas, suelos poco profundos, con baja capacidad de retención, o con impedimentos para la penetración radical, o b) una alta demanda evaporativa, relacionada con altas temperaturas y radiación, baja humedad relativa del aire y vientos fuertes. Hay tres características de la sequía que determinan sus efectos sobre los cultivos: intensidad, duración y momento de ocurrencia en relación con el estado de desarrollo del cultivo. Los mismos autores agregan que para alcanzar la máxima productividad es necesario que la oferta de recursos (agua, nutrientes, radiación) estén disponibles no sólo en forma suficiente sino también en el tiempo (cuando el cultivo tiene las mayores tasas de crecimiento y se están generando los principales componentes del rendimiento, número y peso de granos). Los requerimientos y destino de los recursos serán de mayor magnitud en las etapas reproductivas.

Las características morfológicas y fisiológicas de la soja le otorgan capacidad para compensar daños causados por estrés hídrico. La posibilidad de ramificar, la extensión de la etapa de floración y la producción de un número de estructuras reproductivas superior a las que realmente concreta, son mecanismos que permiten compensar deficiencias hídricas (Andrade y Sadras, 2000a). Las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre el fructificación avanzada y el llenado de granos, etapas entre R4 y R6, es decir el período más crítico de determinación del rendimiento. Esto se debe, a que durante estas etapas la capacidad de compensación del cultivo se ve reducida, debido a que al aborto floral por deficiencias hídricas se le agrega el de las vainas de menor tamaño, que son las estructuras reproductivas que presentan mayor susceptibilidad de abscisión (Giménez, 2014a).

Giménez (2014a) determinó que las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4-R6) provocaron disminuciones significativas en los rendimientos de soja. Se cuantificaron pérdidas de grano que variaron entre 44 y 50%. Las reducciones del rendimiento por deficiencias en las etapas no críticas previas al PC fueron de 23%. El

estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la tasa de crecimiento del cultivo en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el número de granos por metro cuadrado. En las etapas no críticas las deficiencias provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar significativamente el número de granos.

La soja con deficiencias hídricas en la etapa vegetativa tiene posibilidades de compensar en las etapas previas al PC, entre R1 y R3. Se logran mayores rendimientos cuando las deficiencias ocurren en etapas vegetativas y en el PC, que cuando las deficiencias ocurren sólo en el PC. Esto se debe a que el bienestar hídrico hasta la etapa R3 provoca un elevado crecimiento y un alto número potencial de vainas y granos, lo cual produce una gran competencia por fotoasimilados entre vainas de diferentes tamaños durante el PC. En esta situación cuando se presentan deficiencias hídricas severas en el PC las vainas pequeñas son susceptibles de aborto e impactan en forma negativa y determinante en el número de grano y en el rendimiento final (Giménez, 2014b).

Andriani (2002), reporta que con una misma intensidad de deficiencia es variable el efecto sobre el rendimiento dependiendo del estadio del cultivo. Para el autor, existen tres subperíodos con respuesta diferenciada a la ocurrencia de estrés hídrico: a) el período vegetativo, b) el período de R1- R5 y c) el período de R5 a R7. En estados vegetativos deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50% de agua útil en el suelo) no producen reducciones en el rendimiento en semilla, si bien pueden disminuir el área foliar y la altura de la planta. Intensidades mayores (contenidos entre 20 y el 40 % de agua disponible) podrían producir reducciones en rendimiento en semilla del orden del 10%. El período R1-R5, es el más susceptible a deficiencias hídricas que el anterior, ya que intensidades medias pueden producir reducciones en el rendimiento en semilla del orden del 10 % y deficiencias severas una reducción de 20 % o más. La reducción del rendimiento se debe al aborto de flores y vainas que disminuyen el número final de estas últimas, siendo en parte compensado por el peso de las semillas, si cesa la deficiencia hídrica en la etapa siguiente. El estrés en el período R5-R7 produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de semillas por vaina y del peso de las semillas. Las deficiencias hídricas severas pueden producir pérdidas de rendimiento muy importantes de hasta 40 % o más.

#### 2.6.4. Demanda de agua por el cultivo

Las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración (ET) que presentan en el ambiente en el que se desarrollan (Pereira y Alves, 2005). La evapotranspiración potencial o de referencia (ET<sub>o</sub>) es la demanda evaporativa de la atmósfera, se puede representar por la tasa de ET de una superficie cubierta por una gramínea de altura baja (8 a 15cm) y uniforme, en crecimiento activo,

que cubre totalmente el suelo y que no tiene limitaciones de agua (Doorenbos y Pruitt, citados por Allen et al., 2006). La evapotranspiración máxima de un cultivo se denomina  $ET_c$  y corresponde a la ET del cultivo libre de enfermedades, que se desarrolla en una superficie extensa, sin limitaciones de agua y nutrientes y que logra el rendimiento potencial, Hillel (1990). En condiciones de buena provisión hídrica, el consumo de agua por parte de los cultivos,  $ET_c$ , se encuentra fuertemente relacionado con su cobertura, representada por el IAF. Dicho consumo se conforma por la sumatoria de la transpiración desde las plantas y la evaporación desde el suelo (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración real ( $ET_r$ ) estima el consumo de agua de los cultivos que ocurre en las situaciones reales de campo en condiciones de secano (Giménez y García, 2011). Allen et al. (2006) indican que la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ( $ET_c$  aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de  $ET_c$  debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua. Esto puede resultar en un reducido crecimiento de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de  $ET_c$ .

Doorenbos y Pruitt, citados por Allen et al. (2006), sugieren que se puede obtener el requerimiento de agua de un cultivo o  $ET_c$  multiplicando el término que cuantifica las características del cultivo, denominado coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) por la  $ET_o$ . La relación entre la  $ET_c$  y la  $ET_o$  representa el coeficiente de cultivo o  $K_c$ , que adquiere valores cercanos o superiores a 1 durante las etapas de máxima cobertura del suelo (Allen et al., 2006). Hillel (1990) estima que los valores de  $K_c$  varían ampliamente entre cultivos, debido a diferencias en la altura, rugosidad, características ópticas de las hojas, grado de cobertura, exploración del suelo y resistencia de la canopia a la transpiración, variando también en un cultivo dado a través de la estación de crecimiento.

Reicosky y Heatherly (1990) representaron en forma esquemática la evolución de la ET de soja, mostrando un rápido incremento entre V3 y V6 y valores máximos entre R1 y R6. Para un cultivo de un ciclo de 117 días, el consumo de agua es de 454 mm como media estacional, 4.0 mm día<sup>-1</sup> media diaria estacional y 7.6 mm día<sup>-1</sup> como máxima media diaria.

La  $ET_c$  estimadas fueron superiores a las  $ET_r$  en la mayoría de las situaciones analizadas de una serie histórica de años desde 1984 a 2007, para dos cultivares de soja y para dos regiones climáticamente contrastantes del Uruguay (Giménez y García, 2011). Las diferencias entre  $ET_c$  y  $ET_r$  representan las deficiencias hídricas en los cultivos. Se observaron diferencias entre las  $ET_c$  y las  $ET_r$  de los cultivos en la mayoría

de los años analizados, excepto en años “niño” (1997) o en años con precipitaciones muy superiores al promedio. Se destacan los años “niña” con los menores valores de ETr, así como en años en que las precipitaciones ocurridas estuvieron muy por debajo del promedio (Giménez y García, 2011).

#### 2.6.5. Eficiencia de uso de agua

La eficiencia de uso de agua (EUA) relaciona la producción de materia seca o rendimiento con la ET (DellaMaggiora et al., 2000). La EUA es variable entre especies, debido al tipo de metabolismo (C3 o C4), composición de la biomasa, y entre climas que condicionan la demanda atmosférica. Estos autores, afirman que la baja eficiencia de uso de agua del cultivo de soja se debe principalmente a la baja eficiencia fotosintética de este cultivo y a la mayor concentración energética en los granos.

En soja se ha reportado EUA entre 5-6 y 11 kg mm<sup>-1</sup> (DellaMaggiora et al., 2000). Tanner y Sinclair (1983) estimaron que el consumo va variando de un mínimo de 1 mm día<sup>-1</sup> en las primeras etapas de desarrollo hasta 8 mm día<sup>-1</sup> cuando alcanza el máximo en R5, luego la ET se reduce hacia la madurez del cultivo.

### 2.7. RIEGO

Allen et al. (2006), aseguran que se requiere del riego cuando la cantidad de lluvia sea insuficiente para compensar las pérdidas de agua por evapotranspiración. El objetivo principal del riego es la aplicación del agua en el momento preciso y con la cantidad precisa de agua. Mediante el cálculo del balance diario del agua en la zona de exploración radicular, se pueden planificar las láminas y los momentos de aplicación del riego. Para evitar el estrés hídrico se debe aplicar el riego antes, o en el momento de agotarse la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo.

García (2012), indica que un riego adecuado es cuando se proporciona la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, es decir, antes que el contenido hídrico del suelo les genere un estrés que reduzca el rendimiento. Un suelo, después de recibir lluvias abundantes tiene todos sus poros (macroporos y microporos) llenos de agua. La condición donde todos los macroporos y microporos están llenos de agua se llama suelo saturado. El agua de los macroporos no puede ser retenida por el suelo por lo que, si no hay impedimentos físicos como una capa impermeable, después de 24 a 72 horas (los tiempos son mayores cuanto más pesado sea el suelo) éstos se vacían, quedando los microporos llenos. Esta condición del suelo se llama capacidad de campo (CC) y es la situación ideal para la absorción de agua por parte del cultivo.

García (2012) indica que, a medida que el cultivo va extrayendo agua, ésta va quedando cada vez más retenida por la matriz del suelo, hasta un punto en que el cultivo

ya no es capaz de seguir extrayendo, a pesar de que aún queda agua en el suelo. Esta condición se llama punto de marchitez permanente (PMP) y en esta situación el cultivo muere. De acuerdo con lo anterior, el cultivo puede extraer solo el agua comprendida entre CC y PMP. Esa cantidad se llama agua disponible (AD). Hay un momento en que, a pesar de seguir extrayendo las cantidades no son suficientes para satisfacer la demanda atmosférica y el cultivo sufre estrés, disminuyendo su rendimiento final. A este punto, que separa el contenido de agua en que la extracción se da en confort hídrico del contenido en que la extracción se da con estrés, es conocido como umbral de riego (UR). Este punto también se puede expresar como el porcentaje máximo de agotamiento del AD para no sufrir estrés (p%).

De la misma forma, Allen et al. (2006), afirman que la disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo.

Allen et al. (2006) también indican que, en ausencia de una fuente de agua, el contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reducirá como resultado del consumo de agua por el cultivo. A medida que aumenta el consumo de agua, el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que reducirá su energía potencial y hará más difícil su extracción por las plantas. Eventualmente, se alcanzará un punto donde el cultivo no podrá extraer el agua remanente. En este momento la extracción de agua será nula y se habrá alcanzado el punto de marchitez permanente.

Los contenidos de humedad por encima de CC no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y son drenados, el contenido de humedad por debajo del PMP no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, por tanto, el total de agua disponible en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a CC menos PMP (Allen et al., 2006).

García (2012), afirma que el UR y el p% dependen del cultivo, de su etapa de desarrollo, del tipo de suelo y de la demanda atmosférica. La parte del AD entre CC y UR se conoce como agua fácilmente disponible (AFD). Allen et al. (2006), señalan que el factor p varía de un cultivo a otro, varía normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de  $ET_c$  ( $> 8 \text{ mm d}^{-1}$ ), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de  $ET_c$  ( $< 3 \text{ mm d}^{-1}$ ). Un valor de 0,50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos, por ejemplo, soja.

Allen et al. (2006), indican que el valor de p está en función del poder evaporante de la atmósfera. Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de  $ET_c$  es alto, p será 10-25% menor que los valores presentados en tabla y el

suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de  $p$  será hasta 20% mayor que los valores tabulados. Generalmente se utiliza un valor constante de  $p$  para cada período específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de  $p$  de acuerdo con la tasa de  $ET_c$  es  $p = 0,5 + 0,04 (5 - ET_c)$  donde el valor ajustado de  $p$  es limitado a  $0,1 \leq p \leq 0,8$  y el valor de  $ET_c$  es en  $mm d^{-1}$ .

García (2012) concluyó que un riego correcto consiste en dejar secar el suelo hasta llegar al UR, en ese momento aplicar una cantidad de agua igual al AFD y llevarlo nuevamente a CC. Cuando se riega, esa cantidad igual al AFD se conoce como lámina neta (LN).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y EDÁFICA

Para realizar la caracterización climática ocurrida durante el experimento se extrajeron los datos de temperatura mínima y máxima, evapotranspiración por “Penman” y precipitación de la base de datos climáticos de la estación meteorológica de INIA La Estanzuela, a través de la herramienta INIA. GRAS, así como también los mismos para la serie histórica 1983-2013 con la cual fue comparada la situación climática de la zafra. Con esta información se realizó además un análisis de los posibles efectos de la variación climática sobre el cultivo en estudio.

El trabajo se realizó en el cultivo de soja (*Glycine max*) durante la zafra 2014/2015, en la parcela dos de la chacra 20, del lago de INIA La Estanzuela, Estación Experimental “Dr. Alberto Boerger”, ubicada en el departamento de Colonia a 11 Km de ruta 1. El suelo en el que se desarrolló el experimento pertenece a la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas, sobre basamento Cristalino, según la carta de suelos 1:200.000 para el departamento de Colonia (MGAP. DGRNR. DSA, 1998), y al grupo CONEAT 10.6a. Los suelos dominantes para dicho grupo CONEAT son Brunosoles Eutríticos Típicos LAc,v y Brunosoles Subéutríticos Lúvicos LA c/t con Vertisoles Rúpticos Típicos. Los suelos asociados son Vertisoles Rúpticos Típicos Lac.

Se realizó una descripción hidrológica del suelo sobre el que se instalaron los experimentos. Se llevó a cabo un muestreo a diferentes estratos de profundidad de suelo: 0-20, 20-50, 50-65 y 65-90 cm. Para cada estrato se determinó en el laboratorio de suelo de INIA La Estanzuela, la densidad aparente (DAP), capacidad de almacenaje (CC), punto de marchitez permanente (PMP). Las características hidrológicas se utilizaron para calcular el agua disponible de cada estrato.

#### 3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Se utilizó un diseño experimental de BCA en parcelas sub-divididas con tres repeticiones, constituyendo la condición hídrica la parcela principal, fecha de siembra la sub-parcela, y los siete grupos de madurez las sub-subparcelas, generando 28 tratamientos. La condición hídrica evaluada fue riego y secano, las fechas de siembra fueron octubre y noviembre y los 7 grupos de madurez fueron 3.8, 4.6, 4.9, 5.0, 5.8, 6.5 y 6.8.

##### 3.2.1. Modelo estadístico

$$y_{ijkl} = \mu + C_i + B_j + \varepsilon_{ij} + F_k + (CF)_{ik} + \gamma_{ijk} + G_l + (CG)_{il} + (FG)_{kl} + (CFG)_{ikl} + \delta_{ijkl}$$

Donde:

- $y_{ijkl}$  es la observación correspondiente al  $i$ -ésimo tratamiento principal;  $k$ -ésimo tratamiento secundario;  $l$ -ésimo tratamiento terciario en el  $j$ -ésimo bloque.

- $\mu$  es la media general,

- $C_i$  es el efecto del  $i$ -ésimo tratamiento principal, condición hídrica,

- $B_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo bloque,

- $\varepsilon_{ij}$  es el error (a), a nivel de la parcela principal,

- $F_k$  es el efecto del  $k$ -ésimo tratamiento secundario, fecha de siembra,

- $(CF)_{ik}$  es el efecto de la  $ik$ -ésima interacción condición hídrica x fecha de siembra,

- $\gamma_{ijk}$  es el error (b), a nivel de la sub-parcela,

- $G_l$  es el efecto del  $l$ -ésimo tratamiento terciario, grupo de madurez,

- $(CG)_{il}$  es el efecto de la  $il$ -ésima interacción condición hídrica x grupo de madurez,

- $(FG)_{kl}$  es el efecto de la  $kl$ -ésima interacción fecha de siembra x grupo de madurez,

- $(CFG)_{ikl}$  es el efecto de la  $ikl$ -ésima interacción condición hídrica x fecha de siembra x grupo de madurez,

- $\delta_{ijkl}$  es el error (c), a nivel de la sub-subparcela,

$i = 1, 2, \dots, I$  tratamientos condición hídrica,

$j = 1, 2, \dots, J$  bloques,

$k = 1, 2, \dots, K$  tratamientos fecha de siembra,

$l = 1, 2, \dots, L$  tratamientos grupo de madurez.

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión 2010. Se realizaron análisis de varianzas para todas las variables estudiadas, las medias se compararon por el test de Duncan al 5% de significancia.

### 3.3. MANEJO AGRONÓMICO DE LOS EXPERIMENTOS

Los experimentos fueron instalados en una chacra de INIA La Estanzuela, donde se realiza una secuencia de cultivos de alta productividad, con riego suplementario en los cultivos estivales. La secuencia de cultivos consiste en: avena/soja/trigo/soja/maíz. Los experimentos fueron instalados en el área que correspondía a soja de primera sobre rastrojo de maíz, debido a que el cultivo de avena posterior al de maíz no fue posible implantarlo debido a las condiciones del invierno. Todos los experimentos fueron sembrados en siembra directa con una máquina experimental. Se realizaron dos fechas de siembra: 15/10/2014 y 13/11/2014. Para los experimentos de octubre se utilizó una sembradora experimental a chorrillo, utilizando una distancia entre hileras de 0.19 m. Los experimentos de noviembre se realizaron con una sembradora experimental neumática con cuatro surcos a 0,40 m distancia entre hileras.

Se utilizaron las mismas variedades para ambas fechas de siembra a excepción de aquella correspondiente al grupo de madurez 6.5 donde en octubre se sembró la variedad YM-10-33100 y en noviembre IPRO DM 6563, debido a la disponibilidad de semilla. Las variedades sembradas en ambas fechas de siembra fueron: DM 3810, DM 4612 RSF, DM 4913 RSF, NA 5009, LEO 1823 5885, y DM 6.8 i.

Previo a la instalación del experimento de octubre se realizó una aplicación el 19/08/2014 con la siguiente composición: 2 l/ha de glifosato; 1,5 l/ha de 2-4.D; 0,4 l/ha de Banvel y 300 cc/ha de Agral.90. El 14/10/2014 se realizó con Round up full a razón de 4 l/ha. Previo a la siembra de noviembre se efectuó una aplicación con glifosato Panzer Gold, 3 l/ha, más Starane a razón de 0,5 l/ha. Para ambos ensayos la fertilización se realizó al voleo el 21/10/2014 con 150 kg ha<sup>-1</sup> de 7-40.5S.

Los ensayos se mantuvieron libre de malezas, enfermedades y plagas con el criterio de eliminar los factores reductores del crecimiento, por lo que el manejo para la soja sembrada en octubre contó con una aplicación para malezas de Round-up Max el 26/12/2014 a razón 1,5 kg ha<sup>-1</sup>, tres aplicaciones de insecticidas, el 12/12/2014 con 0,15 l/ha de Alsistyn, el 9/01/2015 con 0,15 l/ha de Alsistyn más 0,18 l/ha de Engeo más 0,1 l/ha de Agral.90 y el 5/02/2015 con 0,18 l/ha de Engeo más 0,1 l/ha de Agral.90 y dos aplicaciones de fungicidas el 9/01/2015 y 5/02/2015 con 0,5 l/ha de Ópera cada una. Para el ensayo sembrado en noviembre se realizaron dos aplicaciones para malezas con 1,5 kg ha<sup>-1</sup> de Round-up Max el 26/12/2014 y el 23/01/2015, tres aplicaciones de insecticidas el 12/12/2014 con 0,15 l/ha de Alsistyn, el 23/01/2015 con 0,125 l/ha de

Intrepid y el 16/02/2015 0,18 l/ha de Engeo más 0,1 l/ha de Agral.90 y una única aplicación de fungicida el 16/02/2015 con 0,5 L/ha de Ópera.

### 3.4. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO

Se realizó un seguimiento de la evolución del agua disponible en el suelo mediante mediciones del contenido hídrico con sondas de neutrones, sensores indirectos precisos para el monitoreo de la humedad volumétrica. La sonda de neutrones utilizada en el ensayo fue el modelo 503 DR HIDROPROBE a diferentes profundidades (15-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90 cm). Se instalaron tubos de aluminio de 110 cm, en las sub-subparcelas de los grupos de madurez 3.8 y 5.8, en ambas condiciones hídricas y fechas de siembra, contabilizando una totalidad de 24 tubos. Se realizaron mediciones con la sonda de neutrones en cada tubo y en cada una de las profundidades mencionadas anteriormente. Los datos medidos con la sonda de neutrones para cada estrato fueron transformados en humedad volumétrica. La humedad volumétrica fue calculada a través de la calibración de la sonda. La calibración de la sonda se realizó con los valores de humedad gravimétrica, densidad aparente y las medidas de la sonda para cada uno de los estratos. Con estos datos se realizaron las regresiones para estimar la humedad volumétrica a través de las medidas de la sonda de neutrones.

De forma complementaria se realizaron balances hídricos para corroborar la evolución del agua en el suelo. Los balances hídricos fueron realizados para cada siembra de octubre y noviembre para un grupo corto y un grupo largo. Para la determinación del Kc se tomó el ciclo del cultivo del GM 3.8 y el GM 5.8. Los datos climáticos fueron extraídos de la base diaria de precipitación y evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica de INIA La Estanzuela (INIA. GRAS, 2015). Las pérdidas y ganancias de agua en el suelo fueron estimadas a través de la siguiente fórmula:

$$BH=R+PP-ETc$$

$$ETc= ETo \times Kc$$

Donde R es agua agregada por riego (mm), PP lluvia (mm) y ETc evapotranspiración de cultivo (mm), ETo es la evapotranspiración del cultivo de referencia y Kc es el coeficiente del cultivo. El Kc utilizado es el recomendado por FAO (Allen et al., 2006). Los balances hídricos permitieron estudiar la evolución del agua disponible en el perfil de suelo, para los cultivos seleccionados, corroborando que las condiciones hídricas de estos fueran acordes a los objetivos planteados. Los balances hídricos se presentan en anexos (ver Anexo 1).

Para atenuar las deficiencias hídricas ocurridas en el cultivo se aplicaron riegos suplementarios utilizando un sistema de ala de avance frontal. En el Cuadro 3 se detallan las láminas aplicadas y el momento para cada experimento.

Cuadro 3. Riegos realizados en los experimentos sembrados en octubre y noviembre.

Fecha	Siembra octubre (mm)	Siembra noviembre (mm)
25/10/2014	15	
15/11/2014	13	13
09/2/2015	25	25
17/2/2015	25	25
23/2/2015	25	25
11/3/2015	15	25
20/3/2015	20	

En el experimento bajo riego sembrado en octubre se aplicaron 103 y 138 mm de agua para el GM 3.8 y 5.8 respectivamente, esta diferencia se debe a que los últimos dos riegos de la siembra de octubre fueron para los grupos de madurez largo. En los experimentos sembrados en noviembre se aplicaron 5 riegos que aportaron 113 mm de agua. El aumento de la oferta hídrica se dio principalmente en febrero y marzo, momento en que las precipitaciones registradas estuvieron por debajo de la media histórica.

### 3.5. DETERMINACIONES EN EL CULTIVO

Se determinó la implantación lograda una semana después de la emergencia del cultivo. Para esto se realizó un conteo del número de plantas en 5 metros lineales, en 8 repeticiones al azar totalizando 40 metros en cada parcela. De esta forma se obtuvo el promedio de plantas logradas por metro cuadrado en cada parcela.

Se registró la fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos según la escala de Fehr y Caviness (1977). La fenología se realizó a partir de la observación del total de plantas de las parcelas y se determinó la fecha de cada estadio cuando el 50% de las plantas presentaban dicho cambio morfológico en el tallo principal.

Se realizaron mediciones de IAF con una frecuencia semanal en la medida que las condiciones meteorológicas lo permitieron. Para la evaluación de este parámetro se utilizó un Ceptómetro, Accu PAR LP-80 Decagon, dichas mediciones se realizaron en todas las parcelas, en cada una de ellas se tomaban tres medidas de la radiación fotosintéticamente activa sobre el suelo y una sobre la canopia. Las mediciones fueron tomadas entre las 12:00 y 14:00 hs en días totalmente despejados.

Se cuantificó el crecimiento del cultivo a través de muestreos de la biomasa aérea en un metro lineal en cada una de las parcelas. Durante el desarrollo del cultivo se realizaron 3 muestreos de materia seca en la etapa reproductiva, siendo éstos correspondientes a los estadios R1, R3 y R5. Se cortó al ras del suelo un metro lineal de plantas en todas las parcelas, estas muestras fueron colocadas en estufas a una temperatura de 60°C durante 72 hs o hasta peso constante. En el estadio R5 se realizó un sub muestreo, se pesó la muestra total en el campo y se llevó a estufa un tercio de la muestra total. Con el peso seco de las muestras se estimó la biomasa acumulada en la hectárea.

Se cuantificó el rendimiento en grano para cada una de las parcelas con una cosechadora experimental. Cada una de las muestras fue pesada y se determinó el contenido de humedad del grano. El peso seco de la muestra fue corregido a 14% de humedad para estimar el rendimiento por hectárea. Se determinó el peso de mil granos (PMG) para cada una de las parcelas. La cuantificación del PMG se realizó a través del peso de dos muestras de 100 granos para cada parcela y el NG se estimó a partir del rendimiento y el PMG.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL PERÍODO DE CULTIVO

Las condiciones climáticas ocurridas durante la estación de crecimiento del cultivo determinan el ambiente de producción y por tanto el rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzable.

#### 4.1.1. Radiación solar incidente

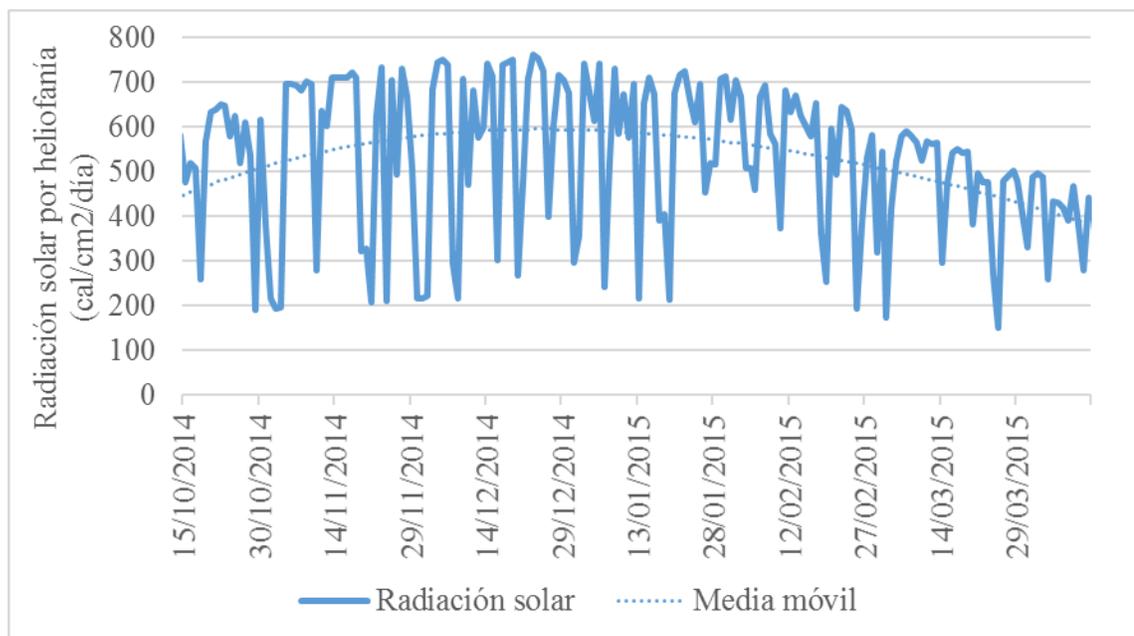


Figura 3. Radiación solar incidente ( $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$ ) ocurridas durante 2014-2015.

La Figura 3 permite identificar los momentos de mayor y menor radiación solar incidente, asociando así los momentos de mayor y menor demanda atmosférica respectivamente. La estrategia de ubicar el período crítico entre los meses de febrero y marzo donde la probabilidad de deficiencias hídricas será menor, trae consigo la menor radiación incidente y una menor probabilidad de lograr altos rendimientos. De esta manera, los cultivares que cuenten con condiciones hídricas favorables y logren localizar el período crítico del cultivo (R3-R6) entre los meses de diciembre y enero, lograrán acercarse a los rendimientos potenciales.

#### 4.1.2. Precipitaciones y evapotranspiración

En la Figura 4 se presentan las precipitaciones (PP) y evapotranspiración (ETP) para la zafra 2014-2015 y para la serie histórica 1983-2013, así como también el agua aplicada por riego para la zafra en estudio en la localidad de INIA La Estanzuela. La precipitación acumulada durante la zafra de cultivos de verano de 2014-2015 fue 22% mayor al promedio histórico del sitio (951 mm vs. 779 mm para la zafra 2014-2015 y para el promedio histórico respectivamente). Durante los primeros meses del ciclo del cultivo (octubre, noviembre y enero) las lluvias ocurridas en la zafra 2014-2015 fueron ampliamente superiores al promedio histórico, mientras que en el resto de los meses estuvieron por debajo de la media. El alto volumen de precipitaciones en el mes de octubre fue producto del evento ocurrido el día 28 de 255mm. Eventos de precipitación de alta intensidad y volumen durante la etapa de implantación del cultivo pueden ser severamente perjudiciales debido a la mortandad de cotiledones que puede ocurrir en condiciones de suelo saturado.

La distribución de las precipitaciones durante la zafra 2014-2015 fue más favorable para aquellas combinaciones de GM y FS que localizan el período crítico del cultivo (R4-R6) en los meses de diciembre y enero con 249 mm de lluvia acumulada, respecto a febrero y marzo con 51 mm de lluvia acumulada.

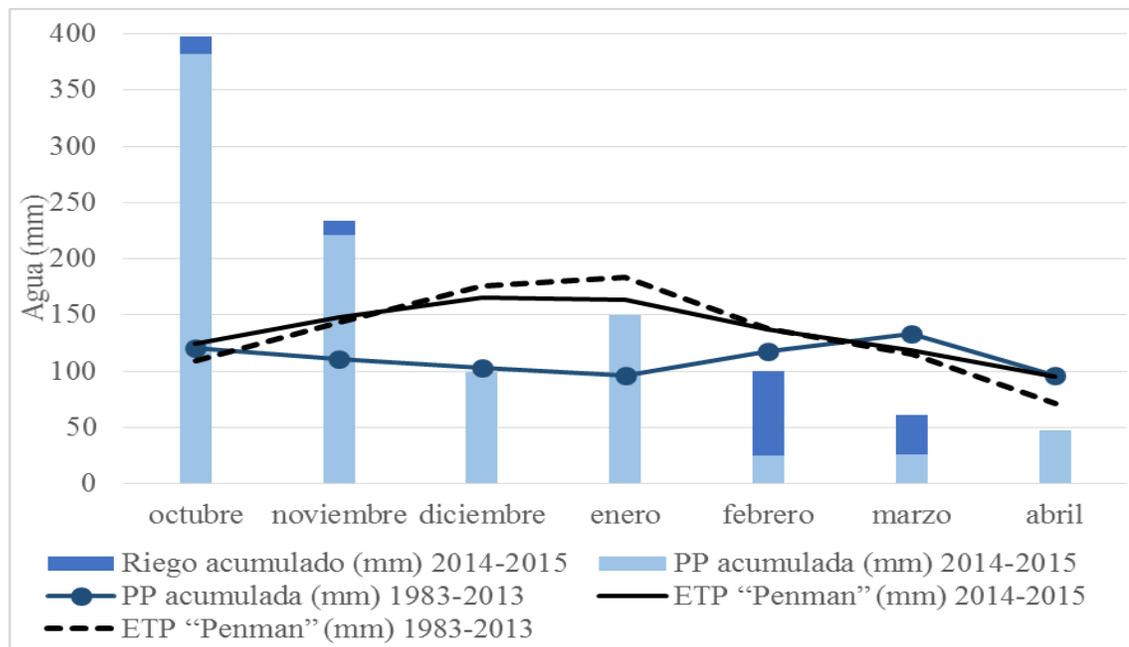


Figura 4. Precipitaciones (mm), riego (mm) y evapotranspiración (mm) ocurridas durante 2014-2015 y promedio histórico para la serie 1983-2013 en la localidad de Estanzuela.

La evapotranspiración de referencia mensual estimada a través de Penman-Monteith es un parámetro que tiene menor variabilidad que las precipitaciones. La variabilidad de la evapotranspiración entre años se asocia principalmente a la radiación solar incidente. Durante los meses de diciembre y enero, donde ocurre la mayor oferta ambiental para el cultivo y mayor potencial, la evapotranspiración de referencia fue levemente inferior al promedio histórico. Esto probablemente se deba a una mayor presencia de días nublados debidos a la ocurrencia de mayores precipitaciones en la zafra 2014-2015 respecto al promedio histórico.

#### 4.1.3. Temperaturas

En la Figura 5 se presentan las temperaturas máximas y mínimas para la zafra 2014-2015 y para la serie histórica 1983-2013 en la localidad de INIA La Estanzuela. Las temperaturas máximas presentan la mayor variación entre períodos con respecto a las mínimas. Durante gran parte de la zafra las temperaturas máximas superaron los valores históricos, difiriendo entre 1 y 3°C. Enero presentó temperaturas máximas 2°C por debajo de los valores históricos, este suceso pudo haber afectado el largo del ciclo de los cultivos. Finalmente, las temperaturas mínimas solo se ubicaron por encima de la serie histórica a inicio y fin de zafra, en 3 y 2°C respectivamente.

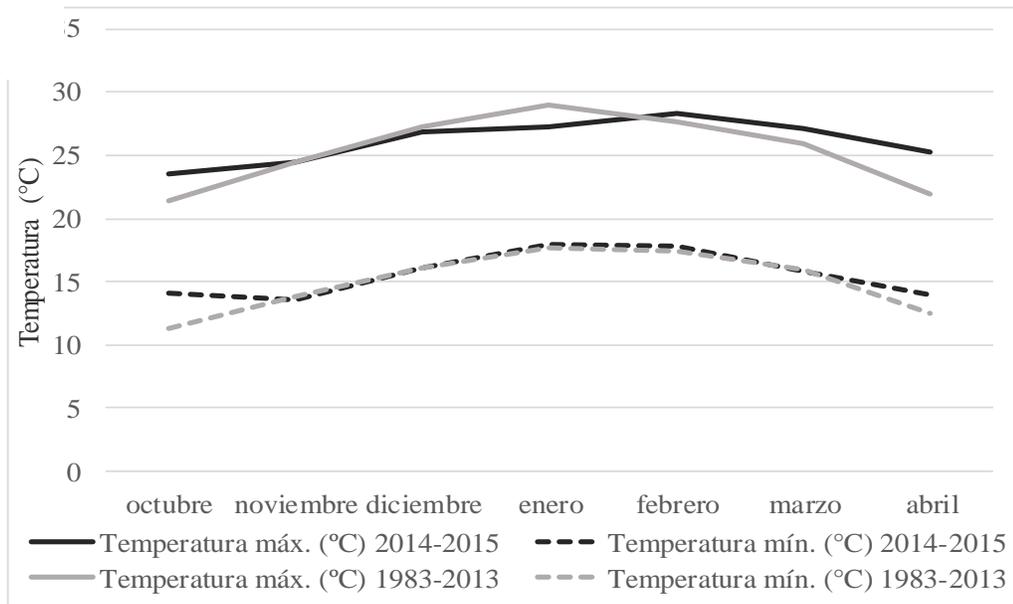


Figura 5. Temperaturas máximas y mínimas (°C) ocurridas durante 2014-2015 y promedio histórico para la serie 1983-2013 en la localidad de Estanzuela.

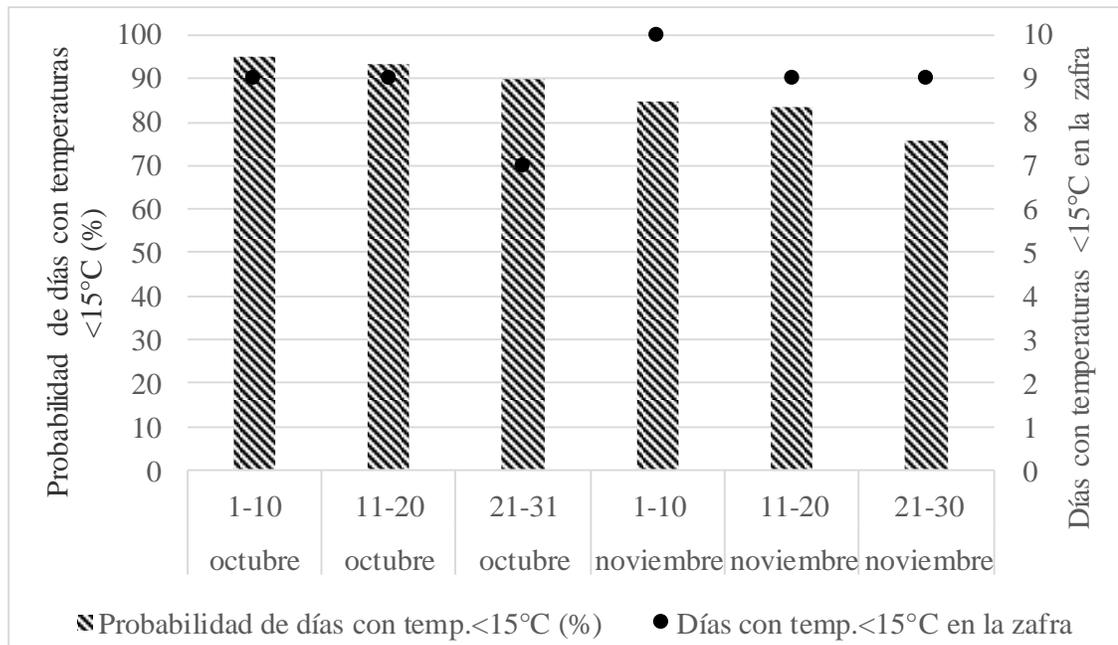


Figura 6. Probabilidad y ocurrencia de días con temperaturas menores a 15 °C, sobre el césped, durante etapas iniciales del cultivo ocurridas en octubre-noviembre de 2014 y la serie histórica 1983-2013 en la localidad de Estanzuela.

La temperatura mínima del suelo es un aspecto relevante que define la germinación de las semillas. Temperaturas superiores a 15°C no afectan la adecuada imbibición y germinación de la semilla (Hussain et al., 2012). La Figura 6 describe la probabilidad de tener temperaturas menores a dicho umbral (15°C) sobre el césped, por décadas, para los meses de octubre y noviembre. Debido a que no se cuenta con la temperatura del suelo a la profundidad que fue sembrada la semilla se tomó como referencia la temperatura sobre el césped. En la medida que avanza la estación de crecimiento desde la primera década de octubre a la última de noviembre disminuye la probabilidad de que las temperaturas sobre el césped sean menores a 15°C, por lo tanto, disminuye la probabilidad de tener una germinación deficiente debido a las bajas temperaturas.

Si bien el riesgo de obtener una implantación deficitaria en octubre es alto, no se observaron problemas de implantación en los experimentos sembrados en dicha fecha. Esto se debe a que en la zafra 2014-2015 donde se instaló el experimento la cantidad de días en octubre con temperaturas menores a 15°C no superó la probabilidad esperada, esto fue más evidente en la tercera década de octubre donde el cultivo se encontraba en las etapas de germinación e implantación (Figura 6). Como se aprecia en la Figura 5, octubre en la zafra de estudio tuvo temperaturas mínimas y máximas

superiores al promedio histórico, sumado a las precipitaciones ocurridas a inicio de ciclo permitieron generar una buena implantación, concretando un buen stand de plantas.

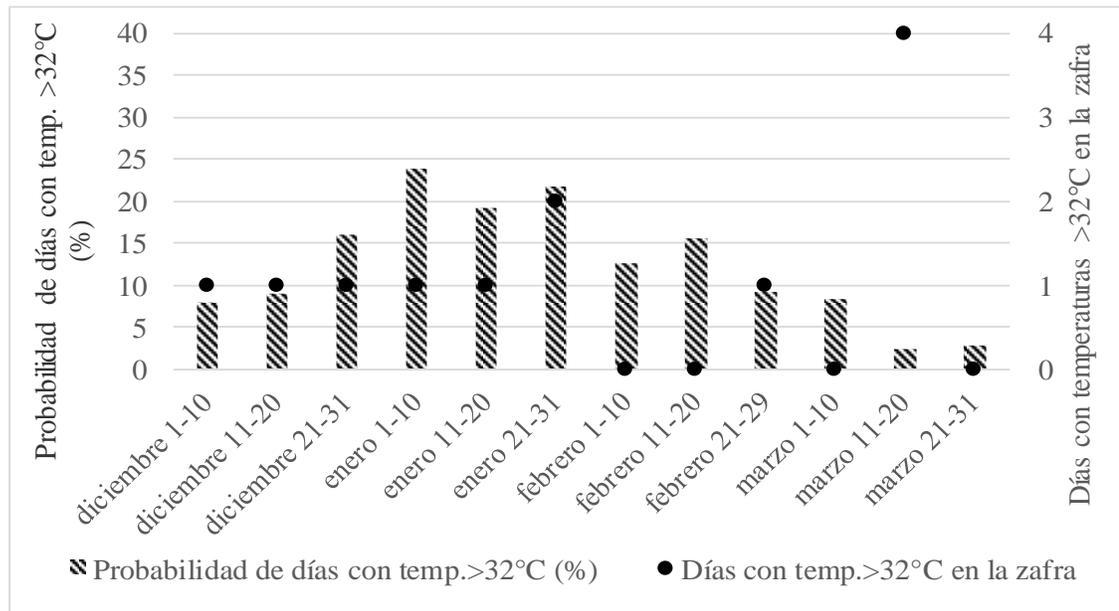
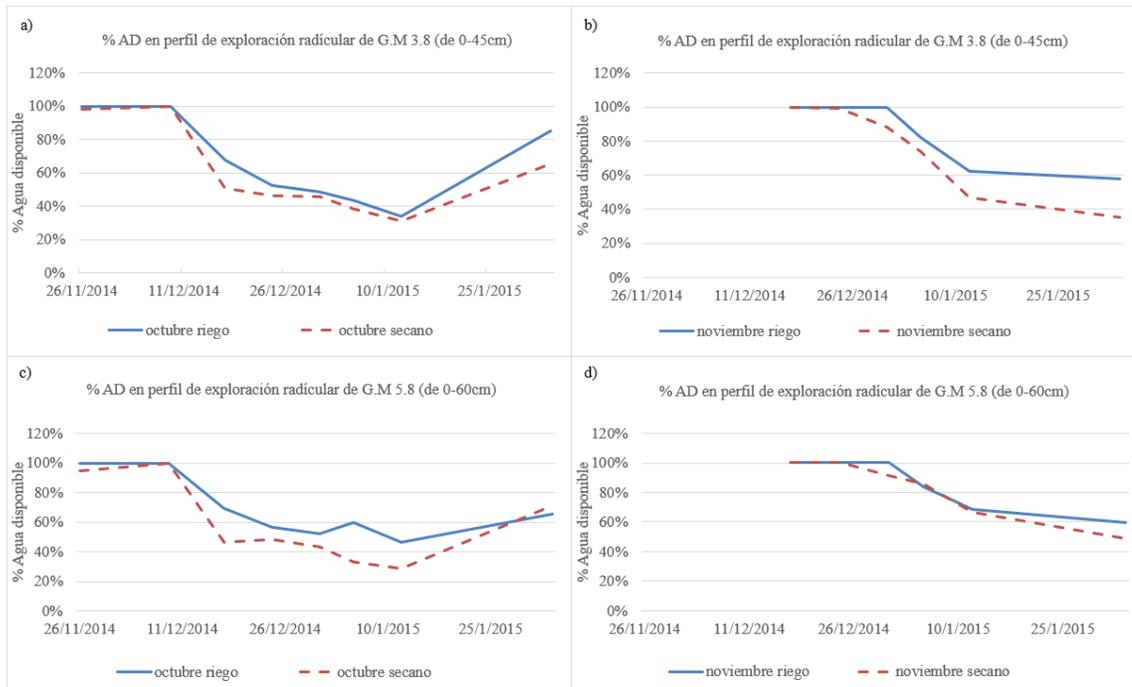


Figura 7. Probabilidad y ocurrencia de días con temperaturas mayores a 32°C durante el período reproductivo del cultivo en la localidad de Estanzuela.

Las altas temperaturas durante los períodos iniciales de la etapa reproductiva inciden sobre la fijación de vainas. Por encima del umbral de temperaturas de 32°C ocurre aborto de vainas (Whigham y Minor, 1983). Por este motivo las temperaturas máximas ocurridas durante el período de fijación y llenado de vainas determina en parte el potencial del cultivo. La Figura 7 describe la probabilidad y ocurrencia de días con temperaturas ambientales mayores a 32 °C durante la etapa reproductiva del cultivo. La ocurrencia de temperaturas superiores a 32°C en la segunda década de marzo sumado a las escasas precipitaciones acumuladas ocurridas en febrero- marzo (51mm) provocan un efecto aditivo en la reducción del ciclo en las etapas reproductivas tardías, justo en momentos en que las variedades de ciclo largo concretan rendimiento. Marzo se destaca por presentar temperaturas máximas superiores al promedio histórico (Figura 5), de esta forma las altas temperaturas afectan el número final de vainas a madurez. Molino (2011) reportó resultados significativos en los efectos de la condición térmica ( $p < 0,001$ ) y de la condición hídrica ( $p < 0,10$ ) sobre el número de vainas fijadas a madurez, indicando aborto de vainas > a 10 mm de longitud cuando ocurrían estreses en estas condiciones.

## 4.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL CULTIVO

En la Figura 8 se presentan los resultados del agua disponible en el suelo para dos GM contrastantes, 3.8 y 5.8, para las FS de octubre y noviembre y bajo las condiciones hídricas de riego y secano. La última medición realizada fue el 03/02/2015 ya que la sonda de neutrones sufrió un desperfecto.



a) grupo de madurez 3.8 y fecha de siembra octubre, b) grupo de madurez 3.8 y fecha de siembra noviembre, c) grupo de madurez 5.8 y fecha de siembra octubre, d) grupo de madurez 5.8 y fecha de siembra noviembre.

Figura 8. Evolución del agua disponible en el perfil de exploración radicular, según régimen hídrico y fecha de siembra, para los grupos de madurez 3.8 y 5.8.

En la siembra de octubre (Figura 8a y 8c) fue donde se constató la mayor caída del agua disponible incluso en el tratamiento de riego. El porcentaje de agua disponible descendió por debajo de 50% en los momentos donde se maximiza la evapotranspiración (última década de diciembre y primera década de enero). Dicho descenso fue más pronunciado en el grupo de madurez corto. Cuando la siembra se localiza a mitad de octubre y se siembran GMs menor a IV, la etapa reproductiva se alcanza previo a los períodos donde se maximiza la radiación solar y la evapotranspiración. Esto conllevó a que existieran ciertas dificultades en suplir a través del riego la alta tasa de extracción de agua por el cultivo en estos momentos. Por este motivo, el porcentaje de agua disponible

durante el período reproductivo fue cercano a 50% o en algún caso tuvo un leve descenso por debajo de este valor.

La bibliografía reporta que el crecimiento de los cultivos y en particular la soja, se reduce cuando el contenido hídrico del suelo disminuye por debajo del 50 % del agua útil (Andrade y Sadras, 2000a), provocando esto caídas en el rendimiento a pesar de la alta plasticidad que presenta en los estadios vegetativos, la cual se reduce durante las etapas reproductivas. El PC de la soja se extiende desde R4 hasta R6 (Fehr y Caviness, 1977), período donde se fija el número de vainas (Andriani, 2002), y en el cual la ocurrencia de cualquier tipo de estrés reducirá el rendimiento más que en otras etapas de desarrollo (Baigorri, 2004). Posiblemente, la reducción del agua disponible por debajo del 50% en este trabajo afectó la expresión del máximo potencial de rendimiento del cultivo.

#### 4.3. DESARROLLO FENOLÓGICO

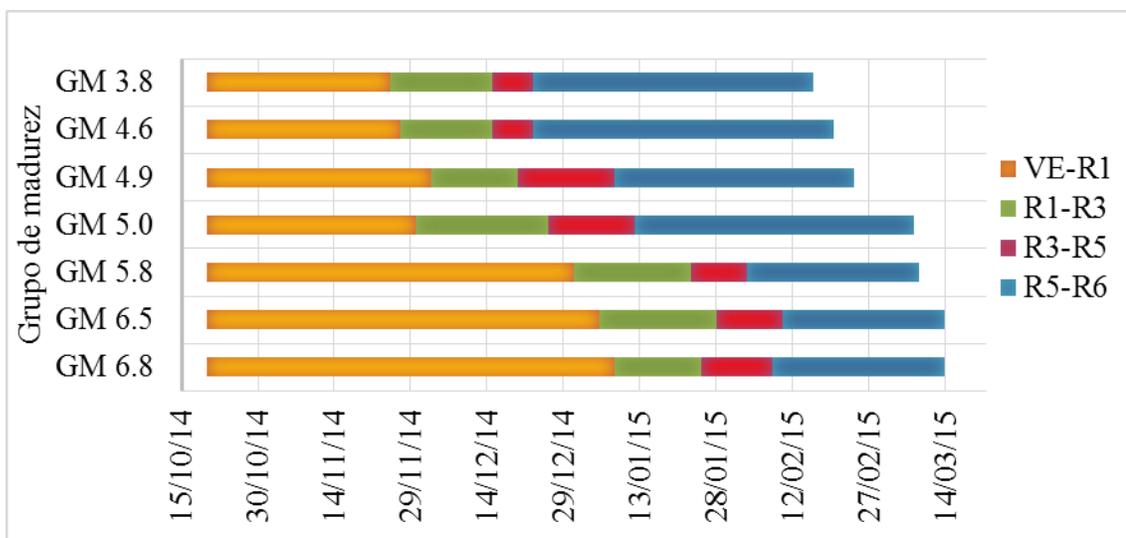


Figura 9. Duración de las diferentes etapas del ciclo del cultivo para los grupos de madurez sembrados en octubre.

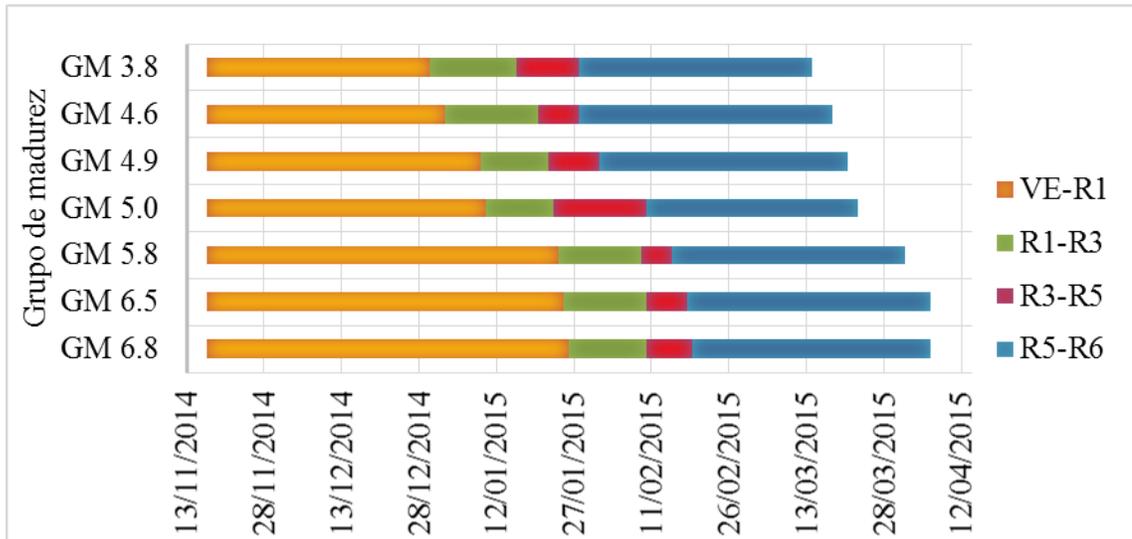


Figura 10. Duración de las diferentes etapas del ciclo del cultivo para los grupos de madurez sembrados en noviembre.

El ensayo contó con un amplio rango de grupo de madurez, desde grupo de madurez 3.8 a 6.8, que permitió contrastar la duración de las diferentes etapas del ciclo, resaltando como variación más notoria la ubicación del período crítico en diferentes momentos de la estación de crecimiento del cultivo, desde mediados de diciembre para cultivares de ciclo corto hasta mediados de febrero para cultivares de ciclo largo, esto se logró mediante la combinación de diferentes fechas de siembra y grupo de madurez. Este manejo permite saber dónde se maximiza el potencial de rendimiento del cultivo para las condiciones de temperatura y radiación incidente del Uruguay.

Para el GM más corto evaluado, el atraso en la fecha de siembra implicó un acortamiento del ciclo a R6 de 2 días, el mismo efecto se registró en los grupos de madurez de ciclo largo, reduciéndose 5 días el ciclo. Setiyono et al. (2007) señalan que atrasos de la fecha de siembra en soja disminuyen la duración del ciclo y del número de nudos del tallo principal, siendo este efecto relativamente mayor cuanto mayor es el largo del ciclo del cultivar.

La duración de las etapas del cultivo están moduladas por factores ambientales, particularmente la de siembra a floración (S-R1) la cual refleja la sensibilidad al fotoperíodo, los genotipos de grupo de madurez corto son menos sensibles al fotoperíodo respondiendo básicamente a la temperatura y los genotipos de grupo de madurez largo se caracterizan por presentar mayor sensibilidad al fotoperíodo, por ello, la importancia de la fecha de siembra radica en que impacta sobre el fotoperíodo y la temperatura modulando principalmente la duración de la etapa S-R1, como así también las etapas reproductivas hasta madurez de cosecha (R8). Aquella fecha de siembra que

logre exponer al período crítico del cultivo a un ambiente con buena disponibilidad de radiación, fotoperíodo largo y temperaturas óptimas permitirá que ocurran las mejores combinaciones para que ocurra la expresión del rendimiento potencial (Vega y Salas, 2012).

#### 4.4. RENDIMIENTO

##### 4.4.1. Potencial de rendimiento por fecha de siembra

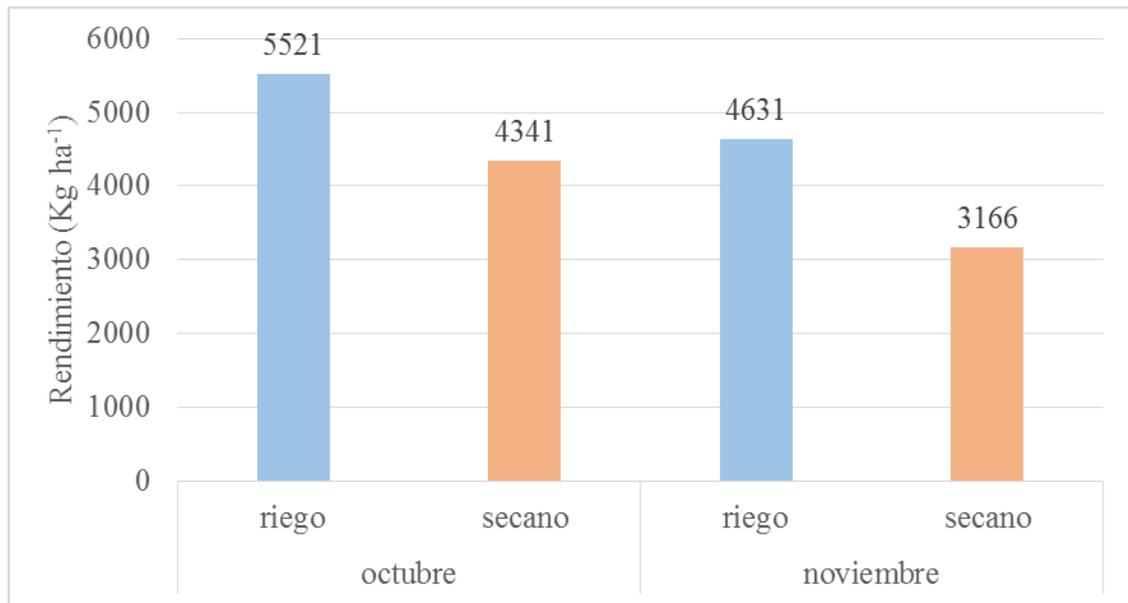


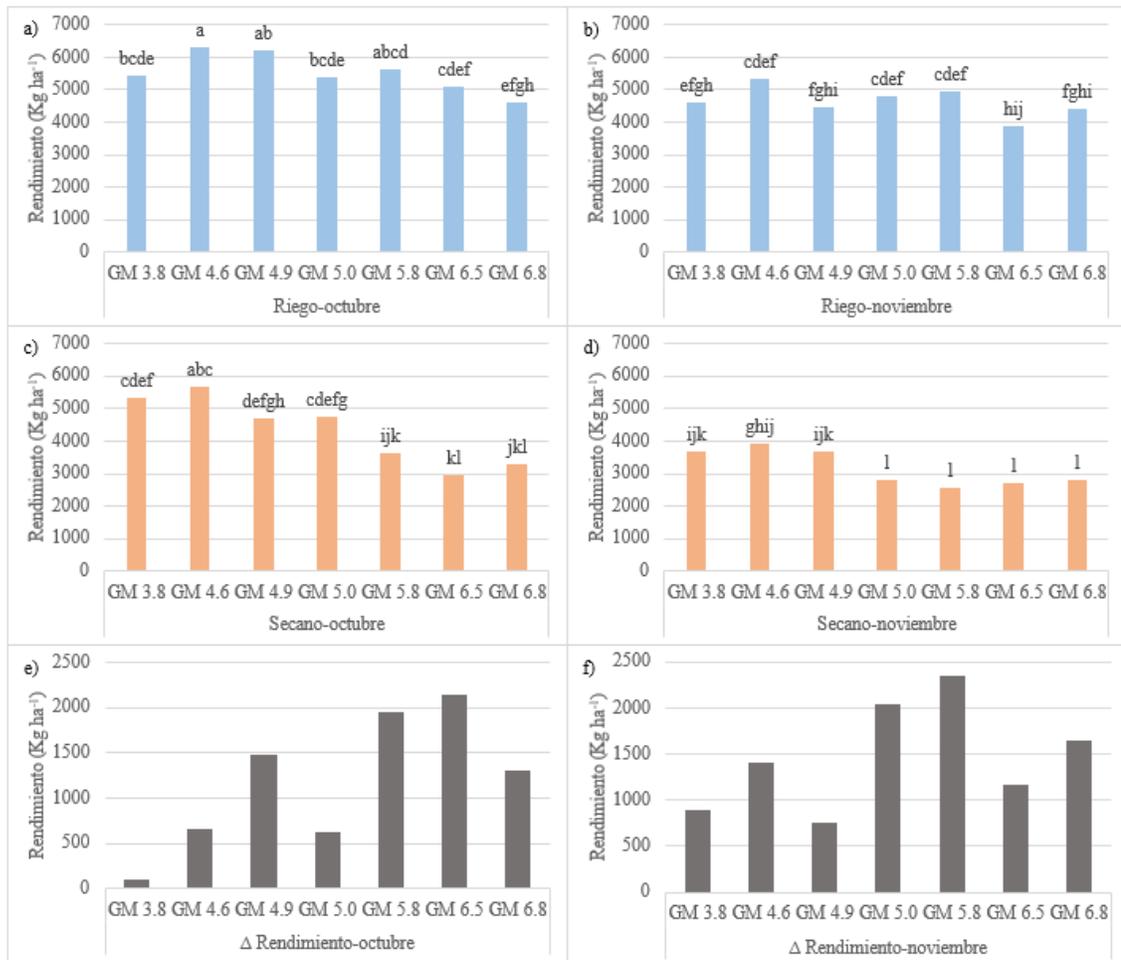
Figura 11. Rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup>) para las distintas fechas de siembra según condición hídrica.

El efecto individual del régimen hídrico en el rendimiento fue estadísticamente significativo según el análisis de ANAVA ( $p < 0,0001$ ), con 5076 kg ha<sup>-1</sup> y 3753 kg ha<sup>-1</sup> para el tratamiento de riego y de secano respectivamente. El efecto individual de fecha de siembra en el rendimiento fue estadísticamente significativo ( $p < 0,0001$ ), con 4931 kg ha<sup>-1</sup> y 3899 kg ha<sup>-1</sup> para la siembra de octubre y noviembre respectivamente. La interacción de fecha de siembra por régimen hídrico no fue significativa ( $p = 0,311$ ), lo cual indica que la incorporación del riego se capitalizó de igual forma en ambos ambientes productivos, dados por la fecha de siembra. Cabe destacar que los mayores rendimientos se observaron en el tratamiento fecha de siembra octubre bajo la condición hídrica de riego, lo que indica que en dicho ambiente es donde se logró el mayor potencial del cultivo (Figura 11). Este mayor rendimiento de los cultivos sembrados en octubre está explicado por la capacidad de expresar su potencial ubicando el PC en momentos donde la oferta ambiental se maximiza.

Si bien la interacción entre la fecha de siembra y grupo de madurez no fue estadísticamente significativa ( $p=0,0657$ ) el rendimiento de los grupos de madurez cortos fue mayor que el de los largos. Para la fecha de siembra de octubre el rendimiento promedio fue de  $5370 \text{ kg ha}^{-1}$  vs.  $3964 \text{ kg ha}^{-1}$ , para el GM 3.8 y 6.8 respectivamente, lo mismo sucedió para la FS de noviembre con rendimientos promedios de  $4145 \text{ kg ha}^{-1}$  vs.  $3610 \text{ kg ha}^{-1}$ , para el GM 3.8 y 6.8 respectivamente.

#### 4.4.2. Potencial de rendimiento para grupo de madurez contrastante

La interacción triple de grupo de madurez, fecha de siembra y condición hídrica fue estadísticamente significativa ( $p=0,0275$ ). En la Figura 12 se describe el rendimiento por grupo de madurez, fecha de siembra y régimen hídrico y la ganancia de rendimiento de cada grupo de madurez y fecha de siembra por la incorporación del riego suplementario.



a) CH riego y FS octubre, b) CH riego y FS noviembre, c) CH secano y FS octubre, d) CH secano y FS noviembre, e) diferencia de rendimiento entre CH riego y secano para FS octubre, f) diferencia de rendimiento entre CH riego y secano para FS noviembre. Columnas con igual letra no difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Duncan).

Figura 12. Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y diferencias en rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de los distintos GM según condición hídrica (CH) y fecha de siembra (FS).

El rendimiento máximo promedio alcanzable fue de  $6313 \text{ kg ha}^{-1}$ , obtenido por la combinación de un GM corto, 4.6, sembrado en octubre bajo la condición hídrica de riego. Este resultado no difirió estadísticamente con los rendimientos obtenidos en el GM 4.9 y 5.8 de la misma fecha de siembra y régimen hídrico, así como también del GM 4.6 sembrado en octubre, pero bajo la condición hídrica de secano, determinando que los mayores rendimientos estadísticamente significativos oscilaran entre  $6313 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $5612 \text{ kg ha}^{-1}$ .

La literatura nacional y regional coincide con los resultados obtenidos en el ensayo. Salvagiotti (2009) indica que los rangos de rendimientos alcanzables son amplios, y se encuentran entre los 4500 y 8000 kg ha<sup>-1</sup>, y además indica que lograr máximos rendimientos potenciales dependerá de que coincida el momento de mayor demanda de recursos por parte del cultivo con la mayor oferta de estos. Giménez (2014a) reporta rendimientos máximos de soja de 7275 kg ha<sup>-1</sup> para tratamientos sin deficiencias hídricas. La evaluación nacional de cultivares realizada en secano, en los materiales evaluados en la zafra 2014-2015, registró rendimientos máximos de 4825 kg ha<sup>-1</sup>, 4989 kg ha<sup>-1</sup> y 5139 kg ha<sup>-1</sup> para cultivares de ciclo corto, medio y largo respectivamente (INIA e INASE, 2015). Las variaciones en los rendimientos máximos de soja son consecuencia de la diferente disponibilidad de radiación, agua y nutrientes. La disponibilidad hídrica es el factor más limitante, por lo que el manejo del agua es el aspecto principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas en producción de soja (Salvagiotti, 2009).

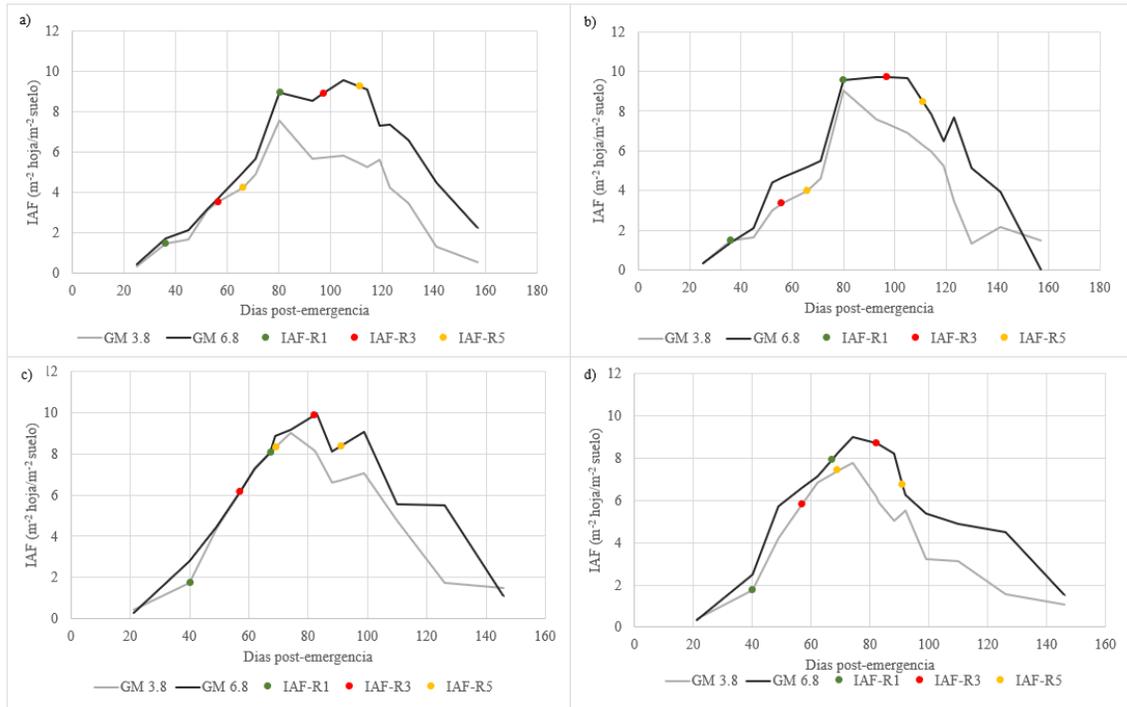
Los cultivares de ciclo corto y para la situación en que el agua no fue una limitante, lograron desarrollar un crecimiento que les permitió llegar con un adecuado crecimiento vegetativo al momento de ubicar su período crítico (R3-R6), en momentos en que la oferta de radiación solar fue mayor, permitiendo así una mayor tasa de crecimiento del cultivo. Posiblemente no fue posible capitalizar la totalidad de la oferta ambiental en los GM cortos sembrados en octubre bajo riego debido a que no se logró cubrir completamente la elevada ETc durante el período crítico.

En cuanto a los GM largos la condición hídrica de riego en ambas FS permitió obtener mayores rendimientos que los tratamientos bajo el régimen de secano, siendo estos estadísticamente significativos. Este hecho probablemente sea debido a que con cultivares de ciclo largo, el período de llenado de grano ocurre en situaciones de menor radiación solar y temperatura y combinado con condiciones de secano, provocan una disminución en el rendimiento.

Estos resultados permiten constatar la importancia de las deficiencias hídricas en el rendimiento, ya que las reducciones varían entre el 2% y 48% para el GM 3.8 sembrado en octubre y 5.8 sembrado en noviembre, respectivamente, ambos bajo la condición de secano. En concordancia con estos resultados, Andriani et al. (1991) señalan que un estrés en llenado de grano (R5-R6), produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de granos por vaina y del peso de los granos y que las deficiencias hídricas severas durante esta etapa provocaron pérdidas de rendimiento mayores a 40 %.

## 4.5. CRECIMIENTO DEL CULTIVO

### 4.5.1. Evolución del área foliar



a) fecha de siembra octubre bajo riego, b) fecha de siembra octubre bajo seco, c) fecha de siembra noviembre bajo riego y d) fecha de siembra noviembre bajo seco.

Figura 13. Evolución de la cobertura del suelo (IAF) para dos grupos de madurez contrastante 3.8 y 5.8 bajo diferentes condiciones hídricas y fecha de siembra.

En la Figura 13 se describe el índice de área foliar de dos GM contrastantes para cada uno de los ambientes productivos definidos por la fecha de siembra y la condición hídrica. La interacción triple de GM, fecha de siembra y condición hídrica no fue estadísticamente significativa para los estadios R1, R3 Y R5 ( $p=0,2635$ ,  $p=0,201$  y  $p=0,3788$  respectivamente).

En todos los tratamientos evaluados el IAF en el grupo de madurez corto, GM 3.8, se caracterizó por presentar menores valores máximos que el grupo largo, GM 6.8. La misma tendencia fue reportada por Villasuso (2015) con IAF máximos de 7,2 y 11,5 para GM cortos y largos respectivamente. El IAF máximo fue determinado por la longitud del período de crecimiento vegetativo y el tamaño de las plantas. Independientemente de la CH, en ambos GM el IAF máximo fue mayor en las siembras

de noviembre que en las de octubre. Esto se asocia a que las condiciones para el crecimiento del cultivo son más favorables en las siembras de noviembre que las de octubre, incrementando la tasa de crecimiento del cultivo.

Para alcanzar una intercepción de la radiación del 95%, es imperativo que el cultivo alcance un índice de área foliar crítico al inicio del período crítico y que se mantenga durante el mayor tiempo posible durante la ontogenia del cultivo (Cárcova et al., 2003). El IAF crítico para soja es de 3.1 a 4.5. En este trabajo, dicho IAF crítico fue superado previo al inicio del período crítico para la definición de rendimiento en todos los grupos de madurez.

Existe una marcada diferencia entre los dos GM en el momento del ciclo donde se alcanza el IAF máximo. En ambas fechas de siembra el GM 3.8 alcanza el estadio de R3 con un valor más bajo de IAF que el GM 6.8, pero el GM 3.8 continúa incrementado el IAF en los estadios posteriores a R3. Villasuso (2015) observó que el IAF alcanzado a R3 se correlacionó positivamente con la duración del período comprendido entre emergencia y R3, por ende, los genotipos de GM mayor exhibieron mayores valores respecto a grupos más cortos. Este hecho se observó en el presente trabajo donde el GM 6.8 presentó mayores valores de IAF al inicio del PC que el GM 3.8.

Fehr y Caviness (1971) mencionan que deterioros del área foliar a partir de R3 pueden afectar la generación de rendimientos potenciales, ya que es conocido que la generación de estructuras foliares procede hasta alrededor del R5.5. La soja puede alcanzar niveles de IAF muy altos, aunque luego de superado el IAF crítico, mayor cantidad de hojas no conduce a mayor captura de radiación o más altas tasas de crecimiento del cultivo (Shibles y Weber, 1965).

Cuadro 4. Tasas de senescencia foliar ( $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) para los GM 3.8 y 6.8 bajo diferentes fechas de siembra y condición hídrica.

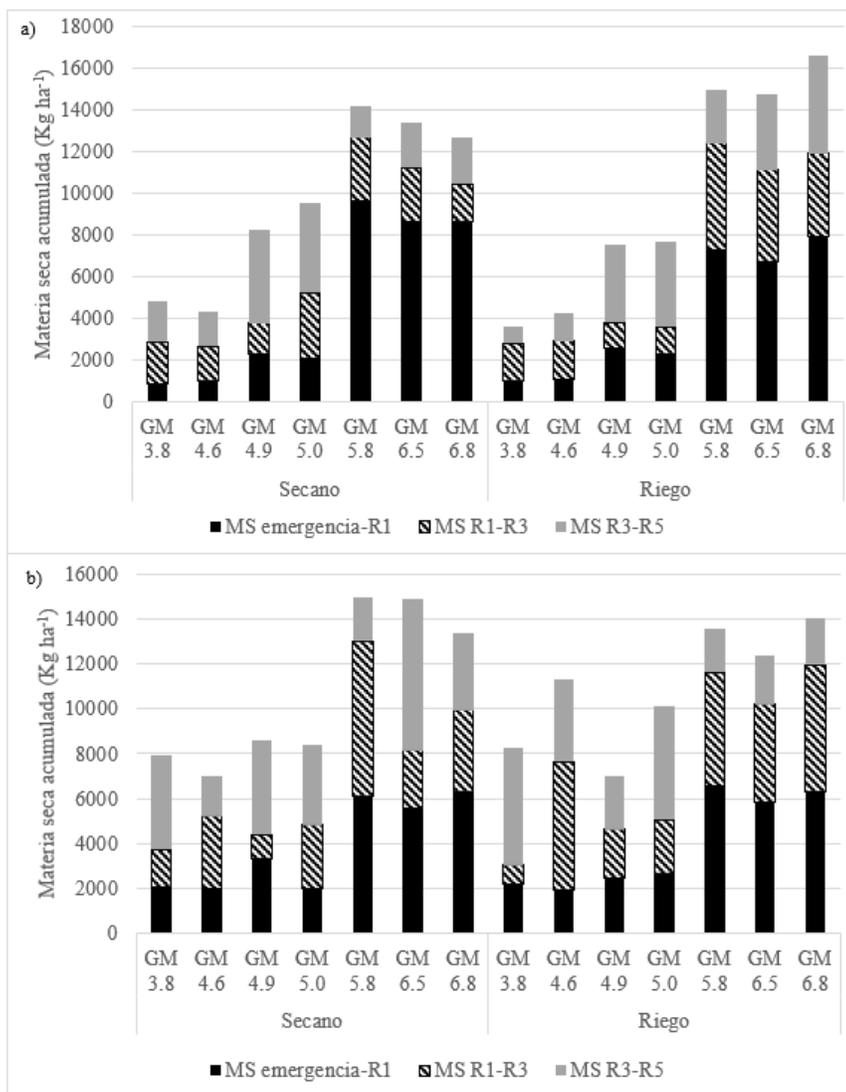
	GM 3.8	GM 6.8
FS octubre-CH riego	-0,09	-0,15
FS octubre-CH secano	-0,10	-0,18
FS noviembre-CH riego	-0,10	-0,14
FS noviembre-CH secano	-0,09	-0,10

La tasa de senescencia foliar representa la pendiente de la evolución del IAF entre el período de máximo IAF y senescencia. El Cuadro 4 describe que dicha tasa fue sensiblemente menor en el GM 3.8 que en el 6.8. Villasuso (2015) reportó valores de tasas de senescencia foliar similares a los obtenidos en este trabajo, los mismos fluctuaron entre -0.09 y -0.13  $m^{-2} \text{ día}^{-1}$  para variedades de GM corto y -0.13 a -0.15  $m^{-2} \text{ día}^{-1}$  en GM medio. Una menor tasa de senescencia en el GM corto significa que el

cultivo mantuvo el área fotosintéticamente activa por un período más prolongado que el GM largo, lo cual está en concordancia con los mayores rendimientos obtenidos por dicho GM.

Para la FS de octubre se observa una mayor tasa de senescencia en el tratamiento de secano para ambos GM, determinado por la duración de esta, el estrés hídrico aceleró dicho proceso. Para la FS de noviembre se observa una mayor tasa de senescencia en el tratamiento de riego para ambos GM, dado por el mayor valor de IAF alcanzado.

#### 4.5.2. Evolución de la materia seca acumulada



a) fecha de siembra octubre y b) fecha de siembra noviembre.

Figura 14. Acumulación de materia seca a R1, R3 y R5 para los diferentes grupos de madurez evaluados bajo riego y secano en las diferentes fechas de siembra.

La producción máxima de biomasa aérea total para la siembra de octubre se dio en los GM largos (5.8, 6.5 y 6.8) para ambos regímenes hídricos, alcanzando a producir aproximadamente 16,6 t ha<sup>-1</sup> el GM más largo bajo riego. Existe diferencia en la partición de MS entre los GM cortos y largos. Si bien los grupos cortos generan menor cantidad de MS a R5, logran concretar un mayor rendimiento, lo cual sugiere que la partición entre órganos vegetativos y reproductivos es variable entre los GM. Los GM cortos llegan a R1 con muy poca MS acumulada, pero continúan creciendo en forma importante en las siguientes etapas (R1-R3 y R3-R5), hecho que no se ve en los GM largo los cuales acumulan la mayor parte de la MS hasta R1.

Las diferencias en MS entre los tratamientos que se observa en la Figura 14 coinciden con lo expresado por Andrade y Sadras (2000a), quienes manifestaron que cultivos sometidos a deficiencias hídricas reducen la interceptación de radiación y/o disminuyen la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. Esta reducción es consecuencia de una menor expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar. Los resultados asimismo coinciden con lo expresado por Andriani (2002) que asegura que deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50 % de AU en el suelo) provocadas durante el período de emergencia-floración disminuyen el área foliar y la altura de planta.

Cuadro 5. Acumulación de MS (kg ha<sup>-1</sup>) a R5 para los diferentes GM según fecha de siembra.

Grupo de madurez	Fecha de siembra	
	octubre	noviembre
GM 3.8	4169 c	8111 b
GM 4.6	4296 c	9139 b
GM 4.9	7883 b	7807 b
GM 5.0	8606 b	9249 b
GM 5.8	13554 a	14239 a
GM 6.5	14082 a	13607 a
GM 6.8	14649 a	12946 a

Resultados con igual letra no difieren entre sí (p<0.05; Duncan).

Se identifican diferencias estadísticamente significativas en la interacción de los GM con la FS para la acumulación de MS a R5 (p=0,0018) así como también para R1 y R3 (p<0,0001).

La fecha de siembra no presentó diferencias significativas para la variable MS a R5 ( $p= 0,0804$ ), así como tampoco para R1 y R3. Si bien los GM cortos sembrados en fechas tempranas reducen el largo de ciclo por anticiparse el período reproductivo, acumulando menos MS que los mismos GM sembrados en noviembre, los cultivares de ciclos más largos sembrados en octubre alargan la duración de este, determinado principalmente por el fotoperíodo, incrementando la acumulación de MS con respecto a los mismos GM en noviembre.

Enrico et al. (2015) utilizando el cultivar DM 4970 bajo condición de secano y fertilización por recomendación lograron una acumulación de materia seca total a R5 de  $9828 \text{ kg ha}^{-1}$ . Para el GM 4.9 del presente ensayo se obtuvieron acumulaciones totales de materia seca a R5 de  $8435 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $7254 \text{ kg ha}^{-1}$  bajo secano y riego respectivamente.

Santachiara et al. (2017) utilizando cultivares de GM 3 y 5 sembrados en la localidad de Zavalla, provincia de Santa Fe, reportaron una acumulación de materia seca entre R1-R5 de  $3560 \text{ kg ha}^{-1}$  para el grupo 3 mientras que para el GM 5 una acumulación de  $3040 \text{ kg ha}^{-1}$ . Similares valores se obtuvieron en el presente ensayo donde para la siembra de octubre el GM 3.8 logró una acumulación de  $3296 \text{ kg ha}^{-1}$  a R5 mientras que para GM 5.8 fue de  $6147 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Si bien es probable que en cierto momento de alta demanda evaporativa el suministro del riego no cubrió por completo la demanda del cultivo (como se observó en los balances hídricos del cultivo), la MS acumulada fue equivalente a la reportada como valores potenciales. De todas formas, es posible que el potencial del cultivo en dichos GM cortos sembrados en octubre sea levemente superior al determinado en este trabajo.

## 4.6. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

### 4.6.1. Número de grano por metro cuadrado

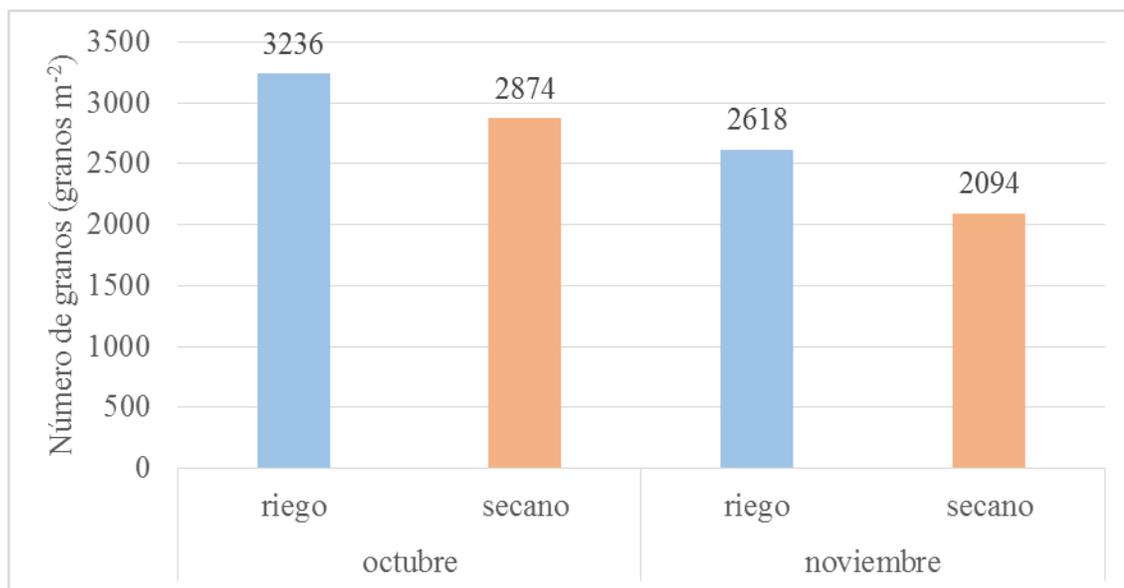
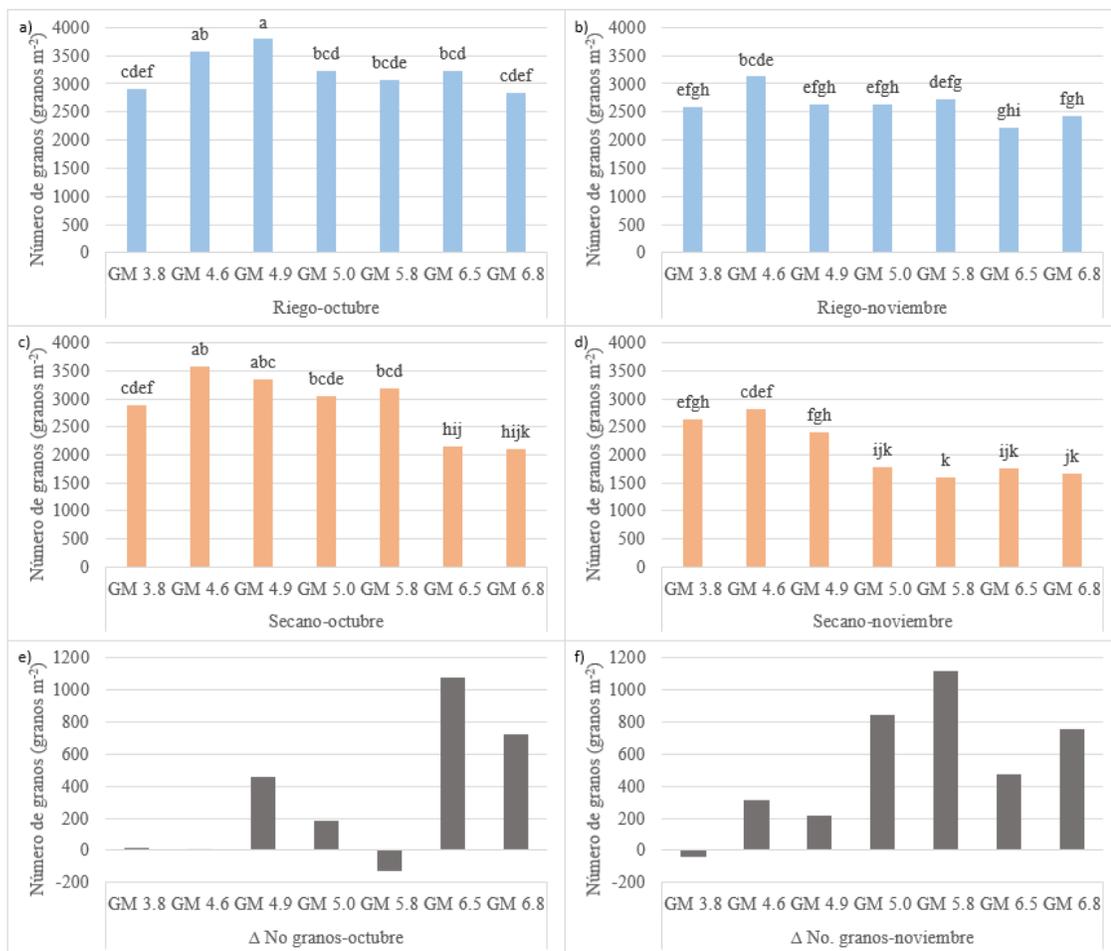


Figura 15. No. de granos m<sup>-2</sup> para las distintas fechas de siembra según condición hídrica.

El NG promedio del tratamiento riego fue superior al promedio de secano, 2931 granos m<sup>-2</sup> y 2465 granos m<sup>-2</sup> respectivamente, siendo estos resultados estadísticamente significativos según el análisis de ANAVA ( $p=0,0001$ ). Para las diferentes fechas de siembra se repitió el comportamiento siendo el rendimiento promedio de octubre superior a la fecha de siembra de noviembre, 3064 granos m<sup>-2</sup> y 2353 granos m<sup>-2</sup> respectivamente, con una diferencia estadísticamente significativa ( $p<0,0001$ ). Cabe destacar que la interacción de ambas variables analizadas anteriormente no presentó diferencias significativas, pero se puede observar que el NG promedio para el tratamiento fecha de siembra octubre bajo la condición hídrica de riego fue ampliamente superior a los demás tratamientos mostrados en la Figura 15.



a) CH riego y FS octubre, b) CH riego y FS noviembre, c) CH secano y FS octubre, d) CH secano y FS noviembre, e) diferencia de NG entre CH riego y secano para FS octubre, f) diferencia de NG entre CH riego y secano para FS noviembre. Columnas con igual letra no difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Duncan).

Figura 16. No. de granos m<sup>-2</sup> y diferencias de este en los distintos GM según condición hídrica (CH) y fecha de siembra (FS).

El máximo NG m<sup>-2</sup> se obtuvo con los GM 4.6 y 4.9 en la CH de riego, 3803 granos m<sup>-2</sup> y 3347 granos m<sup>-2</sup> para el GM 4.6 y 4.9 respectivamente (Figura 16). Ensayos a nivel nacional en soja para tratamientos sin deficiencias hídricas registran máximos en el NG entorno a los 4362 granos m<sup>-2</sup> (Giménez, 2014a). En ensayos anteriores realizados por Grasso y Montero (2011) se obtuvieron resultados similares de 2473 granos m<sup>-2</sup>, estos resultados fueron consecuencia de que se trató de años climáticamente similares en relación con la radiación solar ya que Grasso y Montero (2011) reportaron una radiación solar incidente de 1,46 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> menor a la media, mientras que en el presente ensayo se registraron 2,1 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> por debajo de la media

en el ciclo del cultivo. Por otra parte, Canosa y Prieto (2013) reportaron valores de 3348 granos  $m^{-2}$  en un año donde la RS fue el factor principal que explicó este comportamiento ya que la misma estuvo 2,28  $MJ m^{-2} día^{-1}$  por encima de la media histórica en todo el ciclo.

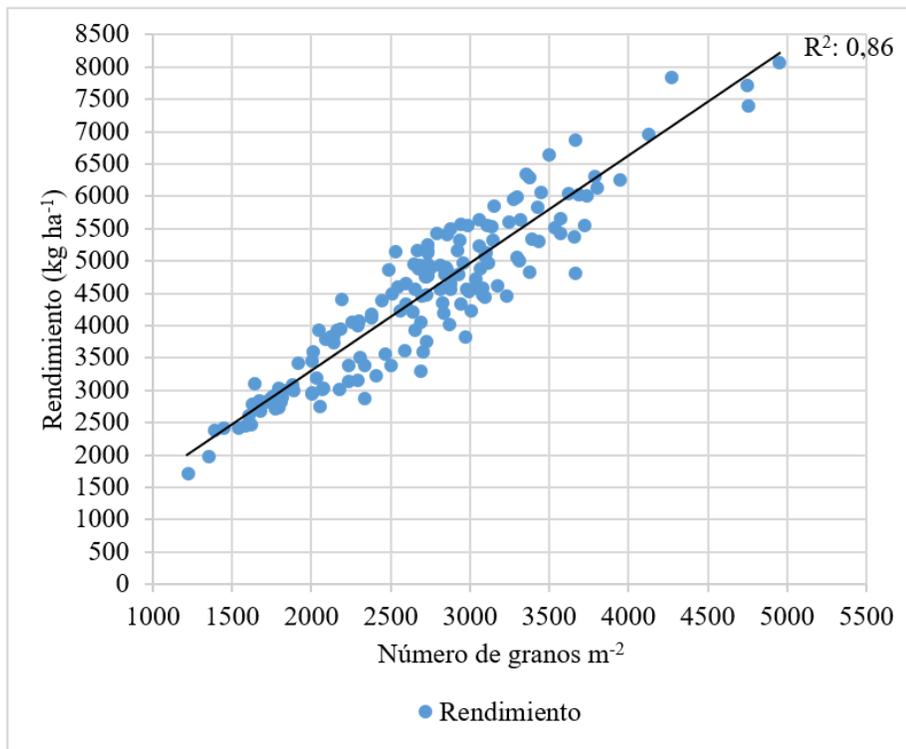


Figura 17. Relación entre rendimiento ( $kg ha^{-1}$ ) y  $NG m^{-2}$ .

Como es ampliamente conocido el rendimiento está estrechamente relacionado al NG por metro cuadrado (Figura 17). La regresión lineal obtenida en este estudio muestra que el 86% de la variación en rendimiento fue explicada por el NG por metro cuadrado. Estos resultados son concordantes con varios trabajos reportados. Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013), quienes obtuvieron una correlación de 98%, mientras que Molino (2011) obtuvo rendimientos en que el componente NG explicó el 84,5% de la variación.

El  $NG m^{-2}$  es afectado por estrés durante el PC (Andrade, 1995). Andrade y Ferreiro (1996) aplicaron un tratamiento de 45 % de sombreado, y otro de reducción de  $\frac{1}{4}$  parte del área foliar de planta en cultivos de maíz, girasol y soja, encontrando que en el caso de soja el componente más afectado siempre fue el NG.

El rendimiento estuvo estrechamente asociado con el NG, en línea con múltiples trabajos que demuestran que éste es el principal componente numérico del rendimiento (Vega et al. 2001, Kantolic et al., 2003b). El NG depende en gran medida de la fotosíntesis ocurrida durante floración y mediados de llenado de granos (Kantolic et al., 2003b).

Kantolic et al. (2003b) afirman que cuando ocurren variaciones en la fotosíntesis en el PC y el NG es reducido, durante el posterior crecimiento de los granos puede aumentar la disponibilidad de asimilados por unidad de grano y consecuentemente aumentar su ritmo de crecimiento y su peso final.

#### 4.6.2. Peso de mil granos

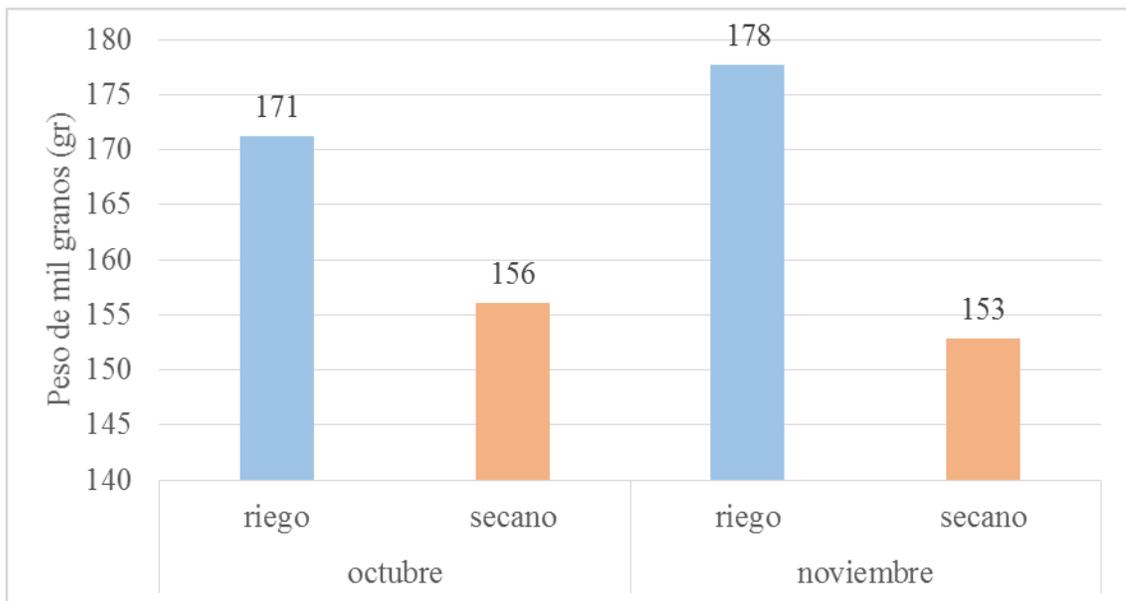
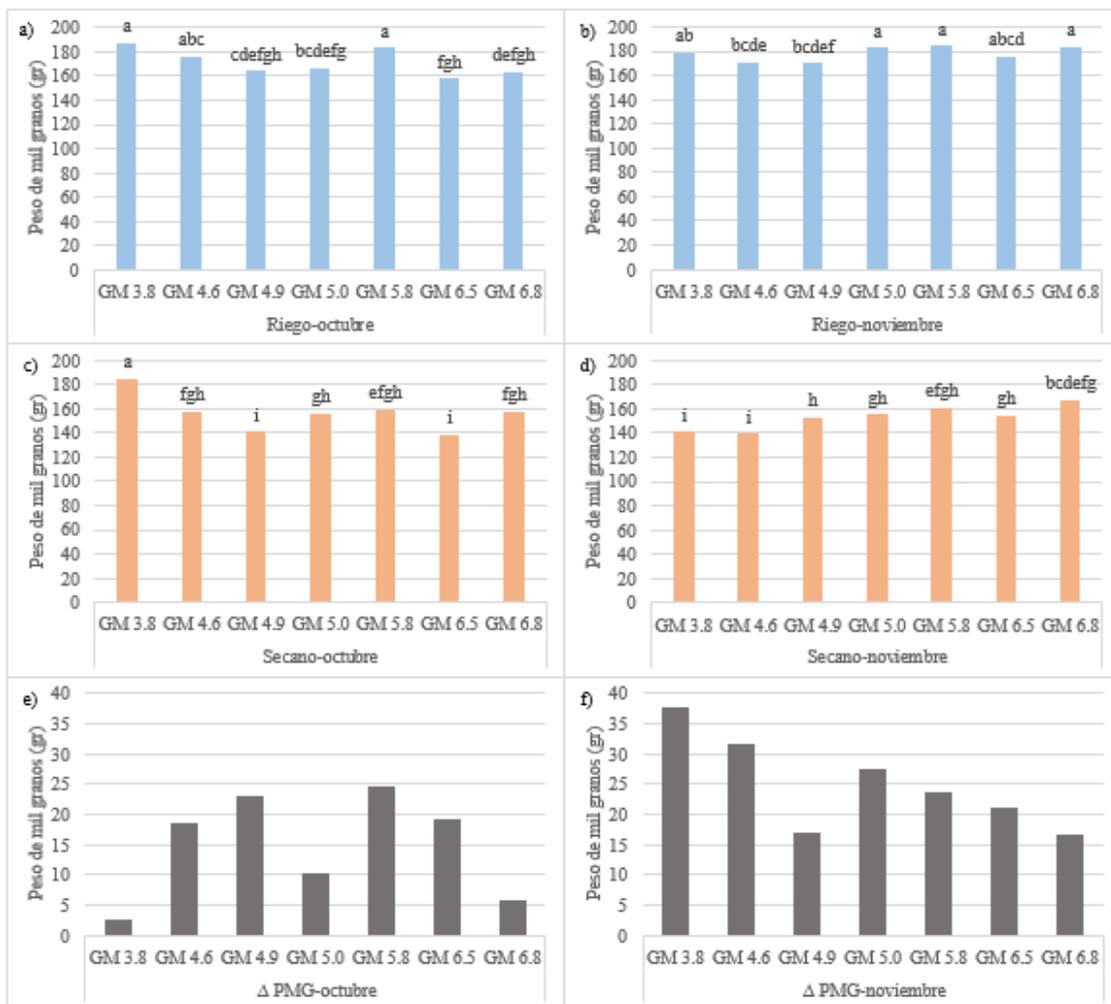


Figura 18. Peso de mil granos (gramos) para las distintas fechas de siembra según condición hídrica.

El efecto individual del régimen hídrico en PMG fue estadísticamente significativos según el análisis de ANAVA ( $p=0,0001$ ), con 174 gr y 154 gr para el tratamiento de riego y de secano respectivamente. El efecto individual de fecha de siembra en el PMG no fue estadísticamente significativo ( $p=0,4427$ ), con 164 gr y 165 gr para la siembra de octubre y noviembre respectivamente. La interacción de fecha de siembra por régimen hídrico fue significativa ( $p=0,036$ ), lo cual indica que la incorporación del riego se capitalizó más en la fecha de siembra de noviembre, logrando el mayor peso de granos promedio para esta combinación (Figura 18).



a) CH riego y FS octubre, b) CH riego y FS noviembre, c) CH secano y FS octubre, d) CH secano y FS noviembre, e) diferencia de PMG entre CH riego y secano para FS octubre, f) diferencia de PMG entre CH riego y secano para FS noviembre. Columnas con igual letra no difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Duncan).

Figura 19. Peso de mil granos (gramos) y diferencias de este en los distintos grupos de madurez según condición hídrica (CH) y fecha de siembra (FS).

La interacción triple de grupo de madurez, fecha de siembra y condición hídrica fue estadísticamente significativa ( $p = 0.0048$ ). En la Figura 19 se describe el rendimiento de cada grupo de madurez para cada uno de los ambientes productivos definidos por la fecha de siembra y la condición hídrica. El PMG varió significativamente entre grupo de

madurez, pero no explicó en mayor medida las diferencias del rendimiento, ya que fue más estable.

El peso de grano a madurez fisiológica está altamente influenciado por el NG fijados y la dinámica de la acumulación que depende a su vez, de la duración del período de llenado y de la tasa de acumulación de biomasa (Cárcova et al., 2003). La soja tiene además la capacidad de compensar (dentro de ciertos límites) reducciones en un componente del rendimiento, debidas a factores de estrés, aumentando el componente subsiguiente, una vez desaparecido el estrés (Andriani y Bodrero, 1995).

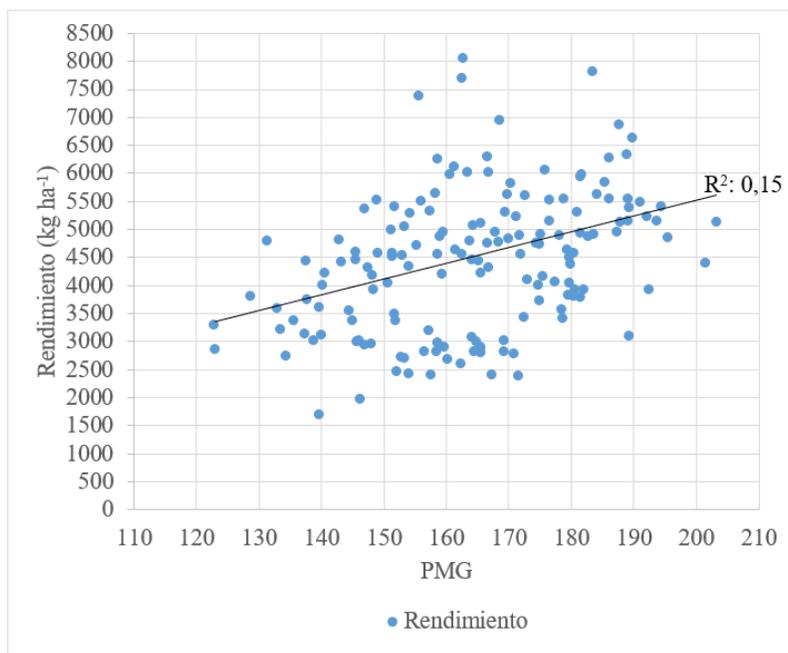


Figura 20. Relación entre rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y PMG.

La relación entre rendimiento y PMG exhibió una tendencia lineal positiva (Figura 20), aunque dicha asociación fue baja ( $R^2 = 15\%$ ), esto se explicó porque este componente del rendimiento es residual, es decir se determina después que se fijó el NG. Por lo tanto, cuando el NG fijados es elevado, los fotoasimilados para la etapa de llenado de granos pueden no ser suficientes para obtener un peso de grano alto.

Estos resultados confirman la extensa información que indica que el rendimiento en grano no se relaciona en forma directa con el peso promedio de grano y sí con el NG por superficie, siendo este último el principal componente del rendimiento en soja (Kantolic y Slafer, 2003c). En general, se conoce que el PMG no explica el rendimiento cuando los cultivos son sembrados en fecha óptima (Vega y Salas, 2012).

Períodos de estrés hídrico impuestos durante el llenado de granos de soja provocaron reducciones significativas del rendimiento debido al menor crecimiento de los granos, como consecuencia del desencadenamiento de una senescencia acelerada (Brevedan y Egli, 2003).

Las fechas de siembra tardías, exponen al cultivo a fotoperíodos más cortos y menores niveles de radiación que pueden traducirse en un menor peso de los granos, al acortar la duración del llenado y reducir la fotosíntesis tardía (Calviño et al., 2003).

## 5. CONCLUSIONES

Los rendimientos más altos observados en este estudio entre 5612 kg ha<sup>-1</sup> y 6313 kg ha<sup>-1</sup> y se correspondieron a la combinación ambiental de fecha de siembras de octubre y GM cortos. Dicha combinación es la que permite explorar la máxima oferta de radiación durante el período crítico del cultivo. El NG fue el componente del rendimiento que explicó los resultados obtenidos en rendimiento.

En cuanto a la variable acumulación de biomasa, si bien la producción máxima total para la siembra de octubre se dio en los grupos de madurez largos (5.8, 6.5 y 6.8) para ambos regímenes hídricos, fueron los grupos de madurez cortos los que lograron concretar un mayor rendimiento. Los grupos de madurez cortos llegan a R1 con muy poca materia seca acumulada, pero continúan creciendo en forma importante en las siguientes etapas (R1-R3 y R3-R5), hecho que no se ve en los grupos de madurez largos los cuales acumulan la mayor parte de la materia seca hasta R1. Esto sugiere que la partición entre órganos vegetativos y reproductivos es variable entre los grupos de madurez.

El IAF máximo fue mayor en las siembras de noviembre que en las de octubre. El grupo de madurez corto 3.8, se caracterizó por presentar menores valores máximos que el grupo largo 6.8. La tasa de senescencia foliar fue sensiblemente menor para el grupo de madurez 3.8 que para el 6.8. La menor tasa de senescencia en el grupo de madurez corto significa que el cultivo mantuvo el área fotosintéticamente activa por un período más prolongado que el grupo de madurez largo, lo cual está en concordancia con los mayores rendimientos obtenidos por dicho grupo de madurez.

## 6. RESUMEN

Se desarrolló un experimento de soja (*Glycine max*) en la parcela dos de la chacra 20, del lago de INIA La Estanzuela, Estación Experimental “Dr. Alberto Boerger”, situada en Colonia, Uruguay, en el verano 2014/15. Con sojas de grupos de madurez contrastantes en diferentes ambientes productivos, dados por las fechas de siembra y condición hídrica, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de crecimiento y rendimiento del cultivo. Se evaluaron 28 tratamientos, con tres repeticiones cada uno, resultado de la combinación de dos condiciones hídricas, riego y secano, dos fechas de siembras, octubre y noviembre, y 7 grupos de madurez 3.8, 4.6, 4.9, 5.0, 5.8, 6.5 y 6.8. La condición hídrica de riego se generó aplicando riegos suplementarios utilizando un sistema de ala de avance frontal. El rendimiento máximo promedio alcanzable fue de 6313 kg ha<sup>-1</sup>, obtenido por la combinación de un GM corto, 4.6, sembrado en octubre bajo la condición hídrica de riego. Este resultado no difirió estadísticamente con los rendimientos obtenidos en el GM 4.9 y 5.8 de la misma fecha de siembra y régimen hídrico, así como también del GM 4.6 sembrado en octubre, pero bajo la condición hídrica de secano, determinando que los mayores rendimientos estadísticamente significativos oscilaran entre 6313 kg ha<sup>-1</sup> y 5612 kg ha<sup>-1</sup>. Este mayor rendimiento de los cultivos sembrados en octubre está explicado por la capacidad de expresar su potencial ubicando el PC en momentos donde la oferta ambiental se maximiza. El número de grano por metro cuadrado explicó el 86% de la variación en rendimiento. Los grupos de madurez cortos llegaron a R1 con muy poca materia seca acumulada, pero continuaron creciendo en forma importante en las siguientes etapas (R1-R3 y R3-R5), hecho que no se vio en los grupos de madurez largos los cuales acumularon la mayor parte de la materia seca hasta R1. Esto sugiere que la partición entre órganos vegetativos y reproductivos es variable entre los grupos de madurez. El IAF máximo fue mayor en las siembras de noviembre que en las de octubre. El grupo de madurez corto 3.8, se caracterizó por presentar menores valores máximos que el grupo largo 6.8. La tasa de senescencia foliar fue sensiblemente menor para el grupo de madurez 3.8 que para el 6.8. La menor tasa de senescencia en el grupo de madurez corto significa que el cultivo mantuvo el área fotosintéticamente activa por un período más prolongado que el grupo de madurez largo, lo cual está en concordancia con los mayores rendimientos obtenidos por dicho grupo de madurez.

Palabras clave: *Glycine max*; Condición hídrica; Fecha de siembra; Grupo de madurez; Rendimiento; Período crítico.

## 7. SUMMARY

An investigation on soybean (*Glycine max*) has been developed on patch 2 in farm 20 from the lake in “INIA La Estanzuela”. Experimental station “Dr. Alberto Boerger”, located in Colonia, Uruguay, during the summer of 2014/15. With soybeans from contrasting growth group in different productive environments, given by the crop date and soil water condition, the objective of this task was to evaluate the growth potential and crop yield. According to the process, 28 treatments were evaluated, with 3 repetitions each, as the outcome of the combination of 2 soil water conditions, supplementary irrigation and dry, 2 planting dates, october and november, and 7 growths groups 3.8, 4.6, 4.9, 5.0, 5.8, 6.5 y 6.8. The soil water condition of supplementary irrigation was generated with a system of frontal forward wing irrigation. The average maximum crop yield was 6313 kg ha<sup>-1</sup>, given by the combination of a short GG 4.6, sown in october under the irrigation condition. This outcome was not statistically different from the outcomes obtained on the 4.9 and 5.8 GG from the same crop an irrigation date, as well as the 4.6 GG sown in october, but under the dry water soil condition resulting in the biggest significant crop yields between 6313 kg ha<sup>-1</sup> and 5612 kg ha<sup>-1</sup>. The biggest crop yields in october in explained by the capacity of showing its potential placing the CP at time ere environmental supply is maximized. The number of bean per square meter showed an 86% of crop yield variation. The short growth groups reached a R1 with very little dry matter accumulated, however they kept on growing significantly during the following periods (R1-R3 and R3-R5), this fact was not seen on the long growth groups which gathered the biggest part of dry matter until R1. This suggests that the division between vegetative and reproductive areas is changeable between the growth group. The top LAI on the crop from october and november was bigger. The 3.8 short growth group was characterized by showing smaller top valves than the 6.8 long group. The leaf death rate was smaller for the 3.8 growth group than for the 6.8. The smallest leaf death rate on the short growth group means that the crop kept the area photosynthetically active for a longer period than the long growth group, which is coherent with the biggest crop yield achieved by this growth group.

Key words: *Glycine max*; Soil water conditions; Planting dates; Growth group; Crop yield; Critical period.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 304 p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 56).
2. Andrade, F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*. 41 (1): 1-12.
3. \_\_\_\_\_.; Ferreiro, M. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*. 48: 155-165.
4. \_\_\_\_\_.; Sadras, V. O. 2000a. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
5. \_\_\_\_\_.; Cirilo, A. G. 2000b. Fecha de siembra y rendimientos de los cultivos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 135-153.
6. Andriani, J. M; Andrade, F. H.; Suero, E.; Dardanelli, J. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybean. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie*. 11: 737-746.
7. \_\_\_\_\_.; Bodrero, M. L. 1995. Respuesta de cultivares de soja a la disponibilidad hídrica. Primer Congreso Nacional de Soja y Segunda Reunión Nacional de Oleaginosas. Bs. As. Argentina. 1 (2): 81-87.
8. \_\_\_\_\_. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 2 (3): 48-51.
9. Arbeletche, P.; Gutiérrez, G. 2010. Crecimiento de la agricultura en Uruguay: exclusión social o integración económica en redes. (en línea). *Pampa*. no. 6: 113-138. Consultado 18 set. 2017. Disponible en <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/ojs/index.php/PAMPA/article/download/3179/4722>
10. Baigorri, H. 2004. Criterios para la elección y el manejo de cultivares de soja. Marcos Juárez, INTA. 21 p.

11. Belloso, C. 2003. Criterios en la elección de cultivares de soja, su fecha de siembra y su distancia entre surcos en distintos ambientes. *In*: Satorre, E. H. ed. El libro de la soja. Buenos Aires, AR, SEMA/CREA/AAPRESID. pp. 41-44.
12. Berger, A; Gaso, D. 2013. Validación del modelo Soysim para estimar el rendimiento potencial de soja en Uruguay. *In*: Jornada Objetivo 4 Mil ¿Qué nos falta? (2013, Colonia del Sacramento, Colonia). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. s.p.
13. Bernard, R. L. 1972. Two genes affecting stem termination in soybean. *Crop Science*. 12 (2): 253-239.
14. Bidegain, S. A. 2012. Cuantificación de la respuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 34 p.
15. Board, J. E.; Kahlon, Ch. S. 2011. Soybean yield formation: what controls it and how it can be improved. (en línea). *In*: El- Shemy, H. ed. Soybean physiology and biochemistry. Rijeka, InTech. pp.1-36. Consultado 18 set. 2017. Disponible en <https://www.intechopen.com/books/soybean-physiology-and-biochemistry/soybean-yield-formation-what-controls-it-and-how-it-can-be-improved>.
16. Bodrero, M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. *In*: Jornada Nacional de la Soja (2003, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1- 13 (Actividades de Difusión no. 325).
17. Bramlage, W. J.; Leopold, A. C.; Parrish, D. T. 1978. Chilling stress to soybean during inhibition. *Plant Physiology*. 61: 525-529.
18. Brevedan, R. E.; Egli, D. B. 2003. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*. 43: 2083-2088.
19. Calviño, P. A.; Sadras, V. O.; Andrade, F. H. 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *Field Crops Research*. 83: 67-77.

20. Canosa, G.; Prieto, C. 2013. Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 66 p.
21. Cárcova, J.; Abeledo, L. G.; López, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. In: Satorre, E. H.; Benech, R. L.; Slafer, G. A.; de la Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 75-98.
22. Cassman, K. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potencial, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 96: 5952-5959.
23. Ceretta, S.; Mandl, A. 2002. Adaptación de cultivares de soja en Uruguay. In: Jornada de Girasol y Soja (2002, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. (Actividades de Difusión no. 297).
24. \_\_\_\_\_; Vilaró, D. 2003. Comportamiento de sojas de distinto grupo de madurez en Uruguay. In: Jornada Nacional de la Soja (2003, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 115- 122 (Actividades de Difusión no. 325).
25. De la Vega, A. J.; De la Fuente, E. B. 2003. Elección de genotipos. In: Satorre, E. H.; BenechArnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 319-370.
26. DellaMaggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I. 2000. Requerimientos hídricos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.
27. De Melo, V.; Melgar, R.; Vitti, G. 2011. Soja en Latinoamérica; fertilizando para altos rendimientos. Buenos Aires, Argentina, Agroeditorial. 180 p.
28. Enrico, J. M.; García, F.; Stewart, M.; Balboa, G.; Ciampitti, I.; Salvagiotti, F. 2015. Integrando estrategias de manejo de cultivo y fertilización para reducir las brechas de rendimiento en soja en la región pampeana. (en línea). Buenos Aires, IPNI. pp. 19-26. Consultado 30 ago. 2018. Disponible

en [http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/B0789AFB95A5FE24032581AD0067B416/\\$FILE/19.pdf](http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/B0789AFB95A5FE24032581AD0067B416/$FILE/19.pdf)

29. Farías, J. R.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. Ecofisiología da soja. Embrapa. Circular Técnica no. 48. 9 p.
30. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. 12 p.
31. García, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2°, 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 23-31.
32. Gibson, L. R.; Mullen, R. E. 1996. Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Science*. 36: 98-104.
33. Giménez, L. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glicine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia* (Montevideo). 11: 1-9.
34. \_\_\_\_\_.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15(2): 100-108.
35. \_\_\_\_\_. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2°. , 2012, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 35-41.
36. \_\_\_\_\_. 2014a. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia* (Montevideo). 18 (1): 53-64.
37. \_\_\_\_\_. 2014b. Que sabemos del riego de cultivos en Uruguay que falta por investigar In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3°. 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 22-35.
38. Grasso, J. P.; Montero, J. A. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 62 p.

39. Hadley, P.; Roberts, E. H.; Summerfield, R. J.; Michin, F. R. 1984. Effects of temperature and photoperiod on flowering in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill): a quantitative model. *Annals of Botany*, 53: 669 - 681.
40. Heinemann, A. B.; Maia, A.; Dourado-Neto, D.; Ingram, K. T.; Hoogenboom, G. 2006. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO<sub>2</sub> enrichment under different temperature regimes. *European Journal of Agronomy*. 24: 52-61.
41. Hillel, D. 1990. Role of Irrigation in agricultural systems. *Agronomy Journal*. 30: 5-30.
42. Hussain, J.; Cheng, L.; Song, F.; Yang, G.; He, G. 2012. Engineering germination fitness for sub-physiological temperatures in plants. *International Journal of Molecular Biology*. 3(2):43-48.
43. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agro-clima y Sistemas de Información, UY). 2015. Banco de datos de las estaciones agroclimáticas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado mar. 2017. Disponible en <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
44. \_\_\_\_\_.; INASE (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY; Instituto Nacional de Semillas, UY). 2015. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja: período 2014. Montevideo. pp. 23-52.
45. Jones, J. W.; Boote, K. J.; Jagtap, S. S.; Mishoe, J. W. 1991. Soybean development. *In*: Hanks, R. J.; Ritchie, J. T. eds. *Modelling plant and soil systems*. Madison, WI, ASA. pp. 71-90.
46. Kantolic, G. 2003a. Bases funcionales de la determinación del rendimiento y manejo del cultivo de soja. *In*: Satorre, E. H. ed. *El libro de la soja*. Buenos Aires, AR, SEMA/CREA/AAPRESID. pp. 29-38.
47. \_\_\_\_\_.; Giménez, P. I.; De La Fuente, E. B. 2003b. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. *In*: Satorre, E. H.; BenechArnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 167-195.

48. \_\_\_\_\_.; Slafer, G. 2003c. Número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperíodo en etapas reproductivas. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 186-187.
49. \_\_\_\_\_.; Satorre, E. 2004. Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. *In*: Díaz Zorita, M.; Duarte, G. eds. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. pp. 19-37.
50. Lobell, D.; Cassman, K.; Field, C. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes and causes. *The Annual Review of Environment and Resources*. 34:179-204.
51. Major, D. J.; Johnson, D. R.; Tanner, J. W.; Anderson, I. C. 1975. Effects of day and temperature on soybean development. *Crop Science*.15: 174 - 179.
52. MGAP. DGRNR. DSA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. División Suelos y Aguas, UY). 1998. Montevideo. 4 p. Consultado mar. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/1628\\_carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_colonia\\_y\\_soriano\\_0.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/1628_carta_de_reconocimiento_de_suelos_colonia_y_soriano_0.pdf)
53. \_\_\_\_\_. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2015. Encuesta agrícola “invierno 2015”. Montevideo. 22 p.
54. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay; segunda aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. 13 p. Consultado 2 set. 2017. Disponible en: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807174344.pdf>
55. Molino, J. 2011. Estrés térmico por alta temperatura en soja (*Glycine max (L.) Merr.*): análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento. Tesis Magister. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 79 p.
56. Peltzer, H. F.; Peltzer, N.G. 2013. Modelo de simulación de fenología de soja (SI.FE.SOJA): una herramienta útil para evitar el estrés hídrico durante el

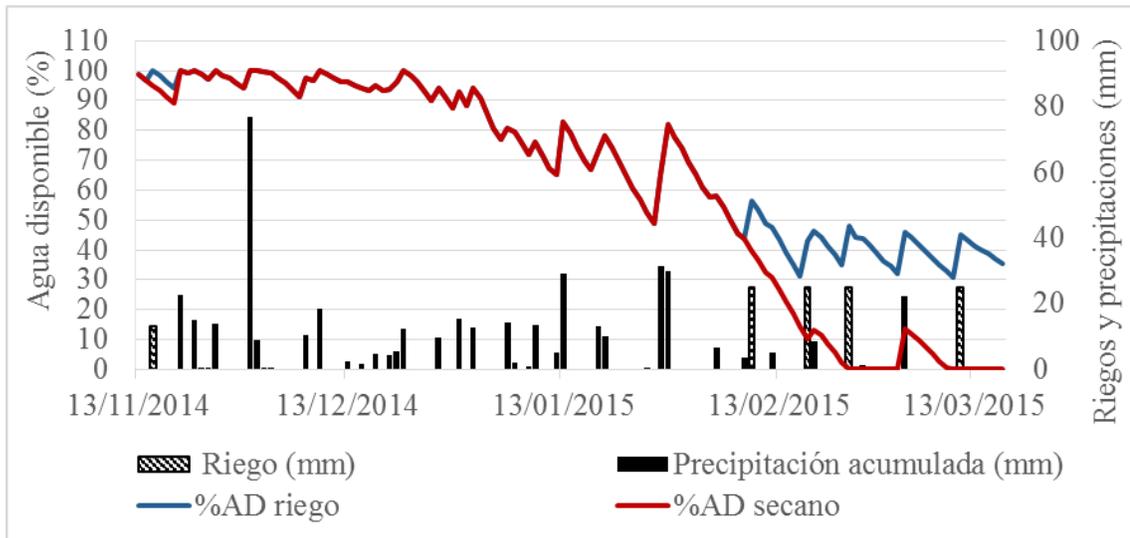
período crítico. Paraná, INTA. Estación Experimental Agropecuaria Paraná. pp. 155-160.

57. Pereira, L. S.; Alves, I. 2005. Crop water requirements. In: Hillel, D. ed. Encyclopedia of soils in the environment. London, Elsevier. v.1, pp. 322-334.
58. Piper, E.; Boote, K.; Jones, J.; Grimm, S. 1996. Comparison of two phenology models for predicting flower and maturity date of soybean. *Crop Science*. 36: 1606-1614.
59. Reicosky, D. C.; Heatherly, L. G. 1990. Soybean. In: Stewart, B. A.; Nielsen, D. R. eds. Irrigation of agricultural crops. Madison, WI, ASA. pp. 639-674 (Agronomy Monograph no. 30).
60. Sadras, V. O.; Ferreiro, M.; Gutheim, F.; Kantolic, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.
61. Salvagiotti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 42: 57-62.
62. Santachiara, G.; Borrás, L.; Rotundo, J. L. 2017. Physiological Processes Leading to Similar Yield in Contrasting Soybean Maturity Groups. *Agronomy Journal*. 109: 158-167.
63. Sawchik, J.; Ceretta, S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (Calmer- Ausid- INIA). In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, La Estanzuela, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 41-51 (Actividades de Difusión no. 417).
64. Setiyono, T. D.; Weiss, A.; Spetch, J.; Bastidas, A. M.; Cassman, K. G.; Dobermann, A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*. 100: 257-271.
65. Shibles, R. M.; Weber, C. R. 1965. Leaf area, solar radiation interception and dry matter production by soybeans. *Crop Science*. 5: 575- 577.

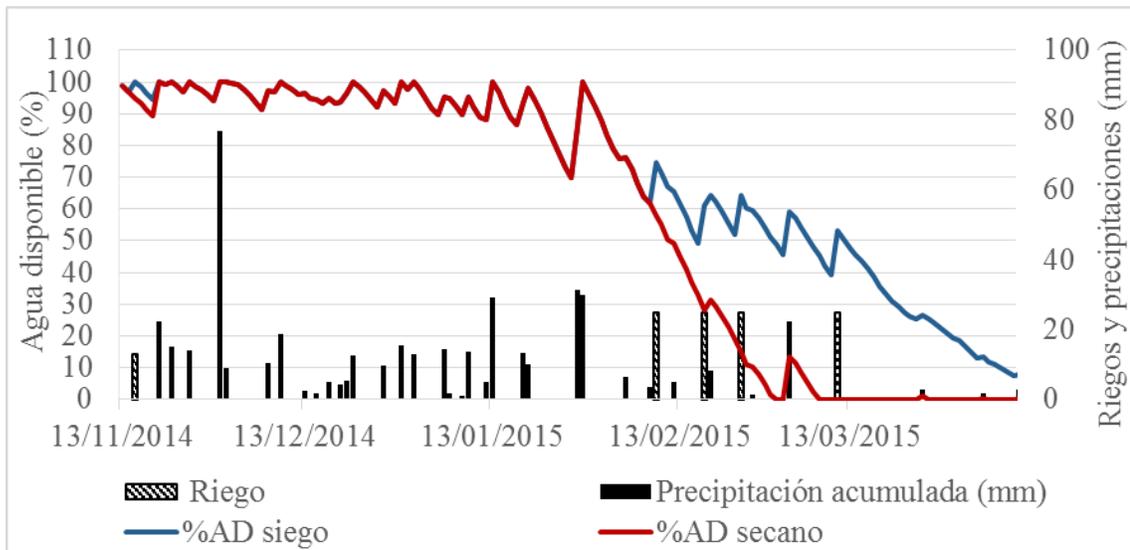
66. Tanner, C. B.; Sinclair, T. R. 1983. Efficient water use in crop production: research or re- research? In: Taylor, H. M.; Jordan, W. A.; Sinclair, T. R. eds. Limitations to efficient water use in crop production. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 1-27.
67. Thomas, J. F.; Raper, C. D. J. 1978. Effect of day and night temperature during floral induction on morphology of soybeans. *Agronomy Journal*. 70: 893-898.
68. Vega, C.; Andrade, F. H.; Sadras V. O. 2001. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. *Field Crops Research*. 72: 163-175.
69. \_\_\_\_\_.; Salas, G. 2012. Bases para el manejo del cultivo de soja. In: Baigorri, H. (In Memoriam); Salado Navarro, L. eds. El cultivo de soja en Argentina. Vicente López, Argentina, Agroeditorial. pp. 147-162.
70. Villasuso, E. 2015. Estrategias de crecimiento y generación del rendimiento potencial en ocho genotipos de soja (*Glycine max (L.) Merr*) que difieren en su grupo de madurez. Tesis Ing. Agr. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Villa María. Instituto A. P. Ciencias Básicas y Aplicadas. 59 p.
71. Whigham, D.; Minor, H. 1983. Características agronómicas en relación con el estrés ambiental. In: Norman, G. ed. Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. pp 79-119.

## 9. ANEXOS

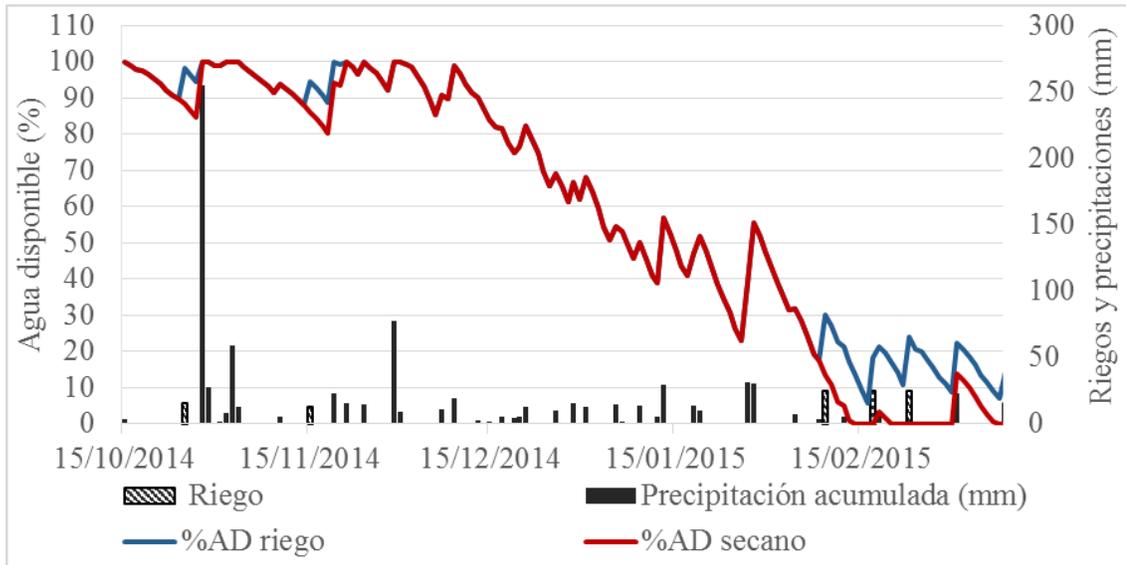
Anexo 1. Evolución del agua disponible en el suelo, según régimen hídrico, para el grupo de madurez 3.8 sembrado en noviembre.



Anexo 2. Evolución del agua disponible en el suelo, según régimen hídrico, para el grupo de madurez 5.8 sembrado en noviembre.



Anexo 3. Evolución del agua disponible en el suelo, según régimen hídrico, para el grupo de madurez 3.8 sembrado en octubre.



Anexo 4. Evolución del agua disponible en el suelo, según régimen hídrico, para el grupo de madurez 5.8 sembrado en octubre.

