

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE DISTINTAS ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO SOBRE EL  
RENDIMIENTO Y EL USO DEL AGUA EN SOJA

por

Gastón Francisco SEBBEN FONTANA  
Santiago Daniel FRIZA RAMALLO  
Martín Ignacio TEJERA PÉREZ

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

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2018

Tesis aprobada por:

Director:

.....  
Ing. Agr. Luis Giménez

.....  
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

.....  
Ing. Agr. Claudio García

Fecha: 28 de febrero de 2018

Autores:

.....  
Gastón Francisco Sebben Fontana

.....  
Santiago Daniel Friza Ramallo

.....  
Martín Ignacio Tejera Pérez

## AGRADECIMIENTOS

### Gastón

En primer lugar, agradezco a mi familia por el apoyo que me brindaron durante toda la carrera, sin el que no hubiese sido posible llegar a esta instancia. Además, agradezco a mi novia Noelia Luaces por el gran soporte que me brindó durante gran parte de este recorrido. Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo en las instancias de campo y de escritorio de nuestro tutor Luis Giménez, Agustín Elliot, Richard Arevalo, Federico Rovegno, Matías López, José Miguel Sebben y Alberto Luaces. También agradezco a mis compañeros Martín Tejera y Santiago Friza, con los que no solamente llevamos a cabo este trabajo de manera conjunta, sino siendo además amigos con los que tuve el gusto de compartir toda la carrera. Agradezco a todos mis amigos y a todos los compañeros de facultad con los que se vivieron muy buenos momentos y experiencias muy enriquecedoras. Por último, agradezco a la Facultad de Agronomía de la UdelaR, institución que hizo posible mi formación, muy especialmente a los docentes que fueron capaces de estimular el gusto y la pasión por el camino que uno eligió.

### Santiago

En primer lugar, quiero agradecerles a mis padres Margarita Ramallo y Daniel Friza por brindarme la motivación y el apoyo necesarios para emprender y culminar la carrera de Ingeniero Agrónomo. Agradecerle a mi novia y compañera Valentina Franco por acompañarme durante todo este camino dándome confianza. Darle especiales agradecimientos a la UDELAR por ser la institución que posibilita nuestra formación tanto profesional como humana. Y por último agradecerles a mis compañeros de tesis Gastón Sebben y Martín Tejera que durante la carrera han sido tanto compañeros como buenos amigos.

### Martín

Se agradece a la familia tanto como a compañeros, amigos y a todas las personas que hicieron posible la elaboración de este trabajo y estuvieron a mi lado durante todo el transcurso de la carrera. Por otra parte, se presenta especial agradecimiento a Agustín Elliot, Matías López, Alvaro Armelino, Santiago Armelino, Richard Arevalo, Graciela Pérez, María Victoria Tejera, Orfilia Martínez y de más personas que colaboraron activamente en la elaboración de este trabajo. Por último quiero agradecer a Gastón Sebben y Santiago Friza sin los cuales no hubiera sido posible la elaboración de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1. LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY .....	2
2.2. CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE SOJA .....	2
2.3. REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS .....	3
2.3.1. <u>Temperatura</u> .....	3
2.3.2. <u>Fotoperíodo</u> .....	4
2.3.3. <u>Interacción entre temperatura y fotoperíodo</u> .....	5
2.4. POTENCIAL Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN SOJA .....	5
2.5. RADIACIÓN Y CRECIMIENTO DEL CULTIVO.....	5
2.5.1. <u>Área foliar e intercepción de radiación</u> .....	5
2.5.2. <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u> .....	7
2.5.3. <u>Producción de materia seca</u> .....	8
2.6. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO .....	9
2.6.1. <u>Deficiencias hídricas</u> .....	9
2.7. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO .....	13
2.7.1. <u>Exigencias hídricas y consumo de agua por el cultivo</u> .....	16
2.7.2. <u>Eficiencia de uso del agua</u> .....	18
2.8. RIEGO.....	19
2.8.1. <u>Manejo del agua de riego</u> .....	19
2.8.2. <u>Riego suplementario</u> .....	20
2.8.3. <u>Riego deficitario</u> .....	21

3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	24
3.1. <u>UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO</u> .....	24
3.1.1. <u>Manejo experimental</u> .....	24
3.1.2. <u>Tratamientos</u> .....	25
3.1.3. <u>Agua de riego y precipitaciones para cada tratamiento</u> .....	27
3.2. <u>DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO</u> .....	28
3.2.1. <u>Hipótesis biológica</u> .....	28
3.2.2. <u>Diseño experimental</u> .....	28
3.3. <u>DETERMINACIONES REALIZADAS</u> .....	28
3.3.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u> .....	28
3.3.2. <u>Determinaciones a cosecha</u> .....	29
3.4. <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u> .....	29
3.4.1. <u>Análisis de la varianza</u> .....	29
3.4.2. <u>Pruebas de comparación múltiple</u> .....	29
3.4.3. <u>Análisis de correlación</u> .....	30
3.5. <u>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA</u> .....	30
3.5.1. <u>Precipitaciones</u> .....	30
3.5.2. <u>Radiación solar incidente</u> .....	31
3.5.3. <u>Temperatura</u> .....	32
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	33
4.1. <u>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO</u> .....	33
4.1.1. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u> .....	33
4.1.2. <u>Parámetros de crecimiento</u> .....	36
4.1.2.1. Producción de materia seca a inicios del periodo crítico .....	36
4.1.2.2. Producción de materia seca a madurez.....	37
4.1.2.3. Efecto del riego deficitario sobre la tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico.....	38
4.1.2.4. Efecto del riego deficitario sobre el índice de área foliar .....	39
4.1.2.5. Relación entre el área foliar e intercepción de radiación .....	42
4.1.2.6. Radiación solar interceptada en distintas etapas fenológicas .....	43

4.1.3. <u>Efecto del riego deficitario sobre el rendimiento</u> .....	45
4.1.4. <u>Relación entre el rendimiento y sus componentes</u> .....	47
4.1.5. <u>Componentes del rendimiento</u> .....	48
4.1.6. <u>Efecto de la radiación sobre los componentes de rendimiento</u> .....	50
4.1.7. <u>Evapotranspiración del cultivo con bienestar hídrico y evapotranspiración del cultivo ajustada con riego deficitario</u> .....	52
4.1.8. <u>Eficiencia de uso del agua</u> .....	55
4.1.9. <u>Principales efectos de las distintas estrategias de riego sobre los parámetros de crecimiento, el rendimiento, los componentes de rendimiento y la eficiencia de uso del agua</u> .....	58
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	61
6. <u>RESUMEN</u> .....	62
7. <u>SUMMARY</u> .....	63
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	64

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo.....	24
2. Calendario de eventos fenológicos. ....	25
3. Riego aplicado en las distintas etapas fenológicas para cada tratamiento.....	27
4. Precipitaciones mensuales registradas (mm.mes <sup>-1</sup> ).....	27
5. Componentes y sub-componentes numéricos del rendimiento de soja. ....	49
6. Radiación solar (RS) incidente media diaria en el periodo crítico (PC) en MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup> , rendimiento (kg.ha <sup>-1</sup> ) y componentes principales de rendimiento para distintos ensayos realizados a nivel nacional, en tratamientos con bienestar hídrico en todo el ciclo.....	51
7. Parámetros de crecimiento del cultivo según estrategia de riego. ....	58
8. Rendimiento, componentes de rendimiento, evapotranspiración total y eficiencia de uso del agua según estrategia de riego.....	59
Figura No.	
1. Precipitaciones ocurridas durante 2015-16 y valores promedio de la serie histórica 1961 a 1990.....	31
2. Radiación solar (MJ.m <sup>-2</sup> .día <sup>-1</sup> ) media diaria mensual durante el año agrícola 2015-16 y de la serie histórica 2002-15. ....	31
3. Temperatura media diaria (°C) ocurrida durante el año agrícola 2015-16 y valores promedio de la serie histórica 2002-15. ....	32
4. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RDC.PC en relación a los días post emergencia. ....	33
5. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RDC.V-PC en relación a los días post emergencia. ....	34
6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RDC.Rep. en relación a los días post emergencia.....	35
7. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RD50%BH en relación a los días post emergencia.....	36
8. Materia seca (kg.ha <sup>-1</sup> ) acumulada a inicios del periodo crítico (R4). ....	37
9. Materia seca (kg ha <sup>-1</sup> ) a madurez (R7).....	38
10. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en periodo R4-R7 (kg MS.ha. <sup>-1</sup> .día <sup>-1</sup> ).....	39
11. Evolución del índice de área foliar (IAF) en función de los días post siembra.....	40
12. Índice de área foliar (IAF) en R4.....	41

13. Regresión entre el índice de área foliar (IAF) y el porcentaje de radiación solar interceptada, para todos los tratamientos.....	42
14. Radiación solar (RS) interceptada acumulada (MJ) en el periodo vegetativo, en R1-R4, en el periodo crítico (PC) y en el total del ciclo.....	43
15. Relación entre el índice de área foliar (IAF) en R4 y la radiación solar (RS) interceptada en R4-R6 (MJ).....	44
16. Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	45
17. Relación entre en rendimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) y el índice de área foliar (IAF) en R4.....	47
18. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) y el número de granos. $\text{m}^{-2}$ .....	47
19. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) y el peso de mil granos (g).....	48
20. Relación entre el número de granos. $\text{m}^{-2}$ y la radiación solar (RS) incidente interceptada en el periodo R4-R6 (MJ).....	50
21. Evolución de la evapotranspiración de cultivo (ETc) en $\text{mm.día}^{-1}$ para el BH y de la evapotranspiración de cultivo ajustada (ETc aj) en $\text{mm.día}^{-1}$ para el RD50%BH.....	53
22. Evolución de la evapotranspiración de cultivo ajustada diaria (ETc aj) en $\text{mm.día}^{-1}$ para los tratamientos RDC.PC, RDC.V-PC y RDC.Rep.....	54
23. Distribución en porcentaje de la evapotranspiración de cultivo (ETc) por tratamiento para las distintas etapas fenológicas del cultivo y total en mm.....	55
24. Eficiencia de uso del agua (EUA) para rendimiento en grano ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ).....	56
25. Relación entre rendimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) y la cantidad de agua efectiva (precipitación efectiva más riego efectivo).....	57



## 1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay se verificó la ocurrencia de dos procesos simultáneos que han determinado un aumento global del área agrícola. Estos se pueden dividir básicamente en expansión del área, es decir el ingreso de áreas pastoriles o ganaderas a esquemas agrícolas; y la intensificación agrícola, esto es, la realización de un mayor número de cultivos por unidad de superficie. Por esto el incremento del área agrícola ha sido sostenido desde la zafra 2002-03 y tuvo a la soja como protagonista principal de esta expansión (Sawchik et al., 2015).

Las transformaciones producidas modificaron las limitantes ambientales más importantes y los principales problemas del manejo agrícola nacional. Los cultivos de verano realizados en secano poseen como principal limitante ambiental la disponibilidad hídrica en primavera y verano, y como consecuencia esta es la determinante fundamental del rendimiento. A su vez, esta se presenta como la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de la brecha entre el rendimiento potencial y el obtenido a nivel comercial. Las causas de estas deficiencias hídricas son la baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, el régimen variable de las precipitaciones y las elevadas demandas atmosféricas del verano. Por lo tanto, solo es posible superar estas limitantes con la aplicación de riego suplementario debido a que las causas de estas no son modificables en forma significativa por otras medidas de manejo. Por otro lado, resultados obtenidos en relación a la disminución del rendimiento por deficiencias hídricas en las etapas de desarrollo de los cultivos de verano han permitido generar expectativas en estrategias de manejo del agua diferentes al riego suplementario durante todo el ciclo (Giménez et al., 2014c). Esto se debe principalmente a las distintas susceptibilidades que presentan los estadios de desarrollo de los cultivos a las deficiencias hídricas.

El riego suplementario durante todo el período de crecimiento de la soja puede recomendarse en áreas donde el riego no está limitado. Sin embargo, si el agua es un recurso limitado y/o costoso, será mejor utilizarla con un método de riego deficitario, sacrificando parte del rendimiento potencial en algunos casos. El rendimiento disminuye con la reducción del riego, mientras que los valores de evapotranspiración aumentan notablemente a medida que este aumenta, por el contrario, los valores de eficiencia de uso del agua disminuyen al aumentar el riego (Sincik et al., 2008).

Este trabajo se realizó enmarcado en una serie de experimentos que intentaron brindar herramientas para la toma de decisiones en el manejo del riego en soja. El objetivo del trabajo fue evaluar la respuesta en rendimiento al riego deficitario durante toda la estación de crecimiento y al riego deficitario controlado en distintas etapas fenológicas de soja, asimismo se planteó estudiar la eficiencia de uso del agua en las diferentes estrategias de riego a evaluar.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY

El Uruguay presenta un clima templado y húmedo, sin embargo, el potencial físico y económico de los sistemas de producción agrícolas es altamente dependiente del comportamiento de las precipitaciones, ya que la mayor parte de los cultivos de verano se realizan en secano (Giménez et al., 2010).

La soja pasó de ocupar 12.000 ha sembradas en el año 2000 a 1.334.000 ha en la temporada 2014-15, siendo la mayor superficie de soja lograda en Uruguay. En la zafra 2015-16 la superficie total con cultivos de verano fue de casi 1.300.000 ha. La soja aportó el 88% del área de verano y su producción fue estimada en 2,2 millones de toneladas, un 29% menos que en la temporada anterior. Esta disminución en la producción se explicó fundamentalmente por la reducción en la superficie sembrada y por las condiciones climáticas adversas que se registraron durante el ciclo del cultivo que afectaron negativamente en el rendimiento (MGAP. DIEA, 2016).

El rendimiento promedio de soja en 2016 fue estimado en 1.937 kg.ha<sup>-1</sup>, esto implicó una disminución del orden del 17% comparado con la temporada anterior en la que se obtuvieron 2.331 kg.ha<sup>-1</sup> y de un 14% con respecto al promedio de las últimas cinco zafras (MGAP. DIEA, 2016).

### 2.2. CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DEL CULTIVO DE SOJA

La escala desarrollada por Fehr y Caviness (1977) es la más utilizada para la descripción de los estadios fenológicos externos del cultivo de soja, donde se distinguen dos etapas principales; una que describe los estados vegetativos y se representa con la letra V y la otra los estados reproductivos simbolizados con la letra R. Con excepción de los estadios VE (emergencia, cotiledones sobre la superficie el suelo) y VC (cotiledonar, los bordes de las hojas unifoliadas no se tocan, cotiledones desplegados), las letras V y R van seguidas de un número que indica un estadio puntual dentro de las etapas vegetativas y reproductivas, respectivamente. Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo ya que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50 % de las plantas del cultivo (Kantolic et al., 2003a).

En los estadios vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Una hoja se encuentra totalmente desarrollada si la hoja superior no se encuentra enrollada, es decir, si los bordes de los folíolos no se tocan. Los estadios reproductivos están basados en la floración (R1 y R2), el desarrollo de vainas (R3 y R4), el llenado de granos (R5 y R6) y

la maduración (R7 y R8) y en la mayoría de ellos se considera el estado de los nudos superiores del tallo principal, independientemente de los órganos presentes en otras posiciones de la planta (Kantolic et al., 2003a). Los números impares corresponden al inicio de las etapas y los pares al desarrollo completo de estas.

La floración en soja comienza en una porción intermedia del tallo principal y progresa luego hacia los nudos superiores e inferiores. La fase de floración puede durar varias semanas y en un mismo momento e incluso en un mismo nudo pueden encontrarse flores recientemente abiertas, flores ya marchitas y vainas creciendo (Kantolic, 2008).

En el tallo principal y en las ramificaciones la expansión de las hojas prosigue durante gran parte del periodo de floración y fructificación, originando una superposición entre la aparición de hojas y la aparición de órganos reproductivos. El número de nudos que se elongan y se hacen visibles luego de la floración dependen del hábito de crecimiento (HC) pero pueden ser modificados por factores ambientales (Kantolic, 2008). La duración del ciclo en que puede haber superposición entre crecimiento vegetativo y reproductivo varía entre los HC determinado, semideterminado e indeterminado, tomando valores de 20% o menos, 20-40% y 40% o más, respectivamente (Toledo, 2016).

En los estadios R5 y R6 a medida que progresa el llenado de granos comienza un creciente amarillamiento de las hojas, que avanza desde las hojas más viejas de los nudos inferiores hacia las más jóvenes en los estratos superiores de la planta (Kantolic, 2008). En el estadio R6, en las vainas de los nudos superiores los granos tienen un diámetro igual al de la cavidad de la vaina (Toledo, 2016). La madurez fisiológica se alcanza cuando cesa la acumulación de materia seca en el grano en el estadio R8 (Fehr y Caviness, 1977).

### 2.3. REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS

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 (Toledo, 2016). Dichos requerimientos, superpuestos con los cambios estacionales en la temperatura y fotoperíodo dan cuenta de buena parte de la variación en el rendimiento de los cultivos (Sadras et al., 2000).

Kantolic (2008) señala la importancia de caracterizar la respuesta de los cultivares de soja a variaciones de temperatura y fotoperíodo con el objeto de lograr que los estadios más críticos para la determinación del rendimiento se desarrollen en las condiciones ambientales más favorables.

#### 2.3.1. Temperatura

La temperatura regula el desarrollo durante todo el ciclo. La duración de una fase (habitualmente medida en días) depende de la temperatura, siendo esta determinante en la

longitud de cada una de las etapas (Toledo, 2016). Para la mayor parte de las fases de desarrollo se ha estimado una temperatura base por debajo de la cual la tasa de desarrollo es nula. En la medida que la temperatura aumenta por encima de la base, la tasa de desarrollo aumenta hasta que se alcanza una temperatura o un rango de temperaturas óptimas, en las cuales la tasa de desarrollo es máxima. Las temperaturas mayores al rango óptimo disminuyen la tasa de desarrollo, hasta una temperatura máxima donde el desarrollo es nulo (Kantolic, 2008). En general, las temperaturas cardinales (base, óptimas, máxima) tienden a disminuir a medida que avanza el ciclo (Toledo, 2016).

La temperatura también afecta el desarrollo, el establecimiento y el crecimiento de los órganos reproductivos. Se han estimado temperaturas óptimas para el establecimiento de vainas, la duración del llenado de grano, entre otras. También se señala que a pesar de que muchos efectos de la temperatura sobre los órganos reproductivos pueden ser directos sobre su desarrollo, muchas de las respuestas observadas pueden resultar de un efecto combinado de la temperatura sobre el desarrollo y sobre el crecimiento (Kantolic, 2008). La temperatura hasta los 25 a 30 °C en soja tienen efecto positivo en la fotosíntesis y la tasa de crecimiento diaria (Andrade et al., 2000a).

La temperatura base varía entre 6 y 10°C; las temperaturas óptimas diurnas para fotosíntesis están comprendidas entre los 30 y 35 °C (Kantolic, 2008). Las temperaturas óptimas nocturnas para crecimiento se encuentran entre los 21 y 27 °C. La fijación de vainas se retarda con temperaturas menores a 22 °C y cesa con temperaturas menores a 14 °C. Las temperaturas medias por encima de los 25 a 30°C aceleran el desarrollo. Por lo tanto, la temperatura óptima para el desarrollo normal vegetativo y reproductivo del cultivo se encuentra entre los 25°C y 30°C (Toledo, 2016).

### 2.3.2. Fotoperíodo

El efecto principal del fotoperíodo es el de inducir la floración (Toledo, 2016). La soja es una especie de día corto con respuesta cuantitativa. El fotoperíodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos: la floración, la fructificación y el llenado de los granos, condicionando el momento en que comienzan y finalizan las distintas fases y la tasa con que progresan los cambios dentro de la planta (Kantolic et al., 2003a).

Los fotoperíodos mayores a un umbral retrasan la iniciación floral. El valor de fotoperíodo umbral y la sensibilidad fotoperiódica presentan una considerable variabilidad genética: los grupos de madurez (GM) inferiores presentan umbrales elevados y baja sensibilidad y a medida que aumenta el GM disminuye el umbral y aumenta la sensibilidad (Kantolic et al., 2003a).

Además de modificar el momento en el que crecen y se desarrollan los órganos reproductivos, el fotoperíodo afecta el número y tamaño de los órganos reproductivos que se forman. Se ha establecido que el número de granos guarda una relación positiva con la

duración del periodo crítico (PC) al permitir que un mayor crecimiento se acumule durante la etapa de crecimiento de los granos. La duración de esta etapa aumenta con temperaturas frescas y fotoperíodos largos, siendo la respuesta a este último muy dependiente de la sensibilidad fotoperiódica del genotipo (Kantolic, 2008).

### 2.3.3. Interacción entre temperatura y fotoperíodo

La duración de las etapas de desarrollo en soja está regulada simultáneamente por la temperatura y por el fotoperíodo, por tanto, la fenología del cultivo depende de la respuesta genotípica a ambos factores. Así, los GM menores al ser menos sensibles al fotoperíodo responden fundamentalmente a la acumulación térmica, y a medida que es mayor el GM el efecto del fotoperíodo sobre el desarrollo es mayor (Toledo, 2016).

De esta misma manera, Giménez (2007) obtuvo una respuesta diferencial de distintos cultivares a los factores ambientales que regulan el desarrollo en soja y afirma que se debe a mecanismos que controlan la duración de las etapas fenológicas, siendo que en los GMs III y IV la temperatura es el factor determinante y en los GMs V a VIII operan conjuntamente el fotoperíodo y la temperatura.

## 2.4. POTENCIAL Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN SOJA

El rendimiento potencial se define como el rendimiento obtenido de un genotipo que crece sin limitantes hídricas y nutricionales, libre de malezas, plagas y enfermedades bajo la implementación de las buenas prácticas agrícolas (Van Ittersum y Rabbinge, 1997).

En ensayos realizados en Uruguay en soja con condiciones hídricas no limitantes los rendimientos variaron entre 4.885 y 7.275 kg.ha<sup>-1</sup>. En el primer año experimental los rendimientos fueron los más bajos debido a que estuvieron afectados por excesos de precipitaciones (PP) y como consecuencia baja radiación solar incidente, la cual afectó la producción de biomasa, el número de granos.m<sup>-2</sup> y el rendimiento (Giménez, 2012).

Los rendimientos medios logrados a nivel de chacra en las últimas cuatro zafras fueron de 2.324 kg.ha<sup>-1</sup> (MGAP. DIEA, 2016). La falta de una asociación correcta entre las tecnologías adoptadas y la oferta ambiental, sería una de las causas que podrían explicar la importante brecha entre el rendimiento potencial y el real y la pronunciada variabilidad interanual aún en ambientes de alta productividad (Salvagiotti et al., 2010).

## 2.5. RADIACIÓN Y CRECIMIENTO DEL CULTIVO

### 2.5.1. Área foliar e intercepción de radiación

Los mecanismos más importantes en la intercepción de la radiación solar son la ramificación o el macollaje, la expansión foliar, la producción y senescencia de hojas y la

geometría del canopeo (Sadras et al., 2000). La intercepción de luz por un cultivo es descrita habitualmente como función de dos parámetros, siendo su índice de área foliar (IAF) y su coeficiente de extinción (Gardner et al., 1985).

El IAF del cultivo se define como la superficie foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie de suelo (Cárcova et al., 2003). Este varía con el estadio de desarrollo, ya que aumenta con la aparición de hojas y el crecimiento foliar y disminuye con la senescencia de las hojas; y además varía con las condiciones ambientales (Andrade et al., 2000a). En este sentido, Cárcova et al. (2003) definen al IAF como el producto entre el número de hojas y el tamaño de las mismas.

En general, la velocidad con que aparecen las hojas está determinada por la temperatura, y es poco afectada por el estado hídrico y nutricional de la planta. La expansión foliar es afectada en gran medida por la disponibilidad hídrica y nutricional (Andrade et al., 2000a). En relación a esto Cárcova et al. (2003) mencionan que el tamaño de la hoja depende de la duración y de la tasa de expansión foliar de las mismas, respondiendo marcadamente esta última a la disponibilidad de recursos, mientras que la duración no se ve afectada por esto.

Para cualquier cultivo la relación entre la proporción de radiación incidente interceptada y el IAF es curvilínea (Andrade et al., 2000a), a través de una función de tipo exponencial (Cárcova et al., 2003). Para cada cultivo, se denomina IAF crítico al valor mínimo de IAF que permite interceptar el 95% de la radiación incidente (Gardner et al., 1985). El IAF crítico se encuentra entre 3,1 y 4,5; y depende de la estructura de la planta, la densidad de siembra y el espaciamiento entre surco (Toledo, 2013). A su vez, Sadras et al. (2000) afirman que alrededor de R5,5 la planta de soja, alcanza su máxima altura, área foliar y número de nudos. Es necesario entonces lograr la máxima cobertura del canopeo antes de llegar al estadio R5 (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

La cantidad de radiación solar interceptada acumulada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la dinámica de intercepción de dicho cultivo, por lo que, para lograr altos valores de intercepción de la radiación en un cultivo, es importante generar en forma temprana un IAF que permita interceptar rápidamente la mayor proporción de la radiación incidente y, además es esencial que este valor de IAF se mantenga durante el mayor tiempo posible (Cárcova et al., 2003). Se constató una fuerte base experimental que demuestra que el número de granos del cultivo está limitado por su actividad fotosintética, y no por la cantidad de órganos reproductivos que se generen, por lo que existe una relación bastante robusta entre el número de granos y la radiación interceptada acumulada entre R3 y R6 ( $R^2=0,82$ ), y una mayor duración de la etapa permite aumentar el nivel de radiación capturado por el cultivo durante el PC (Kantolic, 2003b).

Se ha encontrado una estrecha relación en numerosos cultivos entre la cantidad de radiación solar interceptada por la planta y su crecimiento en peso. Los bajos valores

de IAF encontrados bajo deficiencias hídricas pueden explicarse como un mecanismo utilizado por las plantas para controlar la transpiración en períodos de déficit hídrico. El balance hídrico negativo durante gran parte del ciclo afectó la expansión foliar, con un IAF inferior al valor crítico durante el período crítico, que afectó la intercepción de la radiación, reduciendo la tasa de crecimiento del cultivo y el rendimiento (Vaiman et al., 2010). Esta reducción se debe primariamente a la menor expansión y/o a un aumento de la senescencia foliar y también atribuible al déficit hídrico que soportó el cultivo durante gran parte del ciclo (Andrade y Sadras, 2000b). Martignone et al. (2010) en experiencias realizadas en dos campañas distintas, concluyen que la diferencia entre años en el grado de estrés hídrico en la primera parte del cultivo determinó las diferencias en el crecimiento de los canopeos.

Sylvester, citado por Cardozo Romero (2008) menciona que en soja cuando se alcanza un IAF entre 5 y 8, este se estabiliza sin sufrir nuevos incrementos. Esto se debe a que las hojas superiores sombrean a las inferiores en una magnitud tal, que la fotosíntesis de estas hojas es insuficiente para compensar la respiración de mantenimiento, por lo cual se desencadenan los procesos de envejecimiento y finalmente la caída de las hojas.

Karam et al. (2005) obtuvieron que las deficiencias hídricas afectaron el IAF y la recuperación de este una vez aliviado el estrés según la etapa del cultivo en que se presentaron las deficiencias. Estos autores obtuvieron que las deficiencias hídricas por dos semanas en R2 redujeron el IAF un 52% comparado al que no presentó deficiencias alcanzando un valor de 4. Luego de aliviado el estrés el IAF incrementó inmediatamente hasta alcanzar un valor en R6 de 5,8. Las deficiencias hídricas con la misma duración en los estadios R5 o R7 también presentaron disminuciones en el IAF, aunque ninguno fue tan importante como el obtenido en R2. Sin embargo, no se encontraron crecimientos en IAF luego de quitado el estrés, observándose una disminución progresiva de los valores de IAF, por lo cual esto se atribuyó en parte a una baja capacidad de las plantas de recuperarse de las deficiencias hídricas en estadios tan avanzados de crecimiento donde el efecto de la senescencia fue notorio.

### 2.5.2. Tasa de crecimiento del cultivo

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es la acumulación de materia seca por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Gardner et al., 1985). Esta presenta una estrecha relación con la intercepción de radiación solar, la que a su vez depende del IAF. La TCC aumenta a medida que se incrementa el IAF hasta que alcanza un valor crítico (Toledo, 2013). En este mismo sentido Mondino y Gómez (2006) obtuvieron que la máxima TCC se dio cuando se alcanzó el mayor porcentaje de intercepción de radiación.

Andrade y Sadras (2000b) en ensayos conducidos sin limitantes hídricas ni nutricionales mencionan TCC de  $18 \pm 0,8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  entre los 40 y 80 días post emergencia. Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013) reportaron, en la misma localidad y con

el mismo cultivar, resultados de TCC durante el PC de  $250 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$  en situaciones de bienestar hídrico. Por otro lado, Foster y Rovegno (2015) registraron una TCC en el PC sin limitantes hídricas de  $134 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$  en un año con menor radiación solar.

Las reducciones en la intercepción y eficiencia en el uso de la radiación como consecuencia del estrés hídrico disminuyen las TCC (Andrade y Sadras, 2000b). Las sequías de un mes de duración inducidas por exclusión de lluvias con coberturas plásticas en Balcarce redujeron las TCC en un 30% para soja (Andriani et al., 1991).

El crecimiento y la supervivencia de los nudos están condicionados por la TCC y los factores ambientales que la regulan. Ante deficiencias nutricionales e hídricas, el número de nudos en las ramas se reduce fuertemente mientras que el número de nudos en el tallo principal no se modifica (Kantolic, 2003b). A su vez, Kantolic et al. (2003a) afirman que en todos los HC el crecimiento de las ramificaciones generalmente es máximo a partir de floración. Por lo tanto, las prácticas de manejo que permitan una buena provisión hídrica y nutricional, principalmente luego de la floración, permiten maximizar el número de nudos que se logran por unidad de superficie (Kantolic, 2003b).

El número de vainas por nudo es altamente variable dentro de la planta, sobre todo en respuesta a cambios ambientales que reducen el crecimiento del cultivo. Por lo tanto, toda condición ambiental que favorezca la TCC, conducirá a maximizar el número de vainas por nudo (Kantolic, 2003b). En el PC la planta de soja maximiza la producción de órganos reproductivos y se define su supervivencia, la cual está íntimamente asociada a la disponibilidad de asimilados, dándose una competencia por estos entre las vainas de cada planta, ya que cada vaina que se produce requiere asimilados para sobrevivir y compete por ellos con las restantes vainas (Kantolic y Slafer, 2003c). En situaciones desfavorables para el crecimiento del cultivo durante R3 se pueden reducir el número de vainas, sin embargo, las pérdidas de este estadio pueden ser compensadas por la producción de nuevas flores y frutos una vez aliviado el estrés (Sadras et al., 2000).

En soja la cantidad de flores diferenciadas y el número de granos por planta son proporcionales a la disponibilidad de recursos por planta durante un amplio periodo reproductivo. Por esto la relación entre el número de granos por planta y la tasa de crecimiento por planta en el periodo reproductivo es lineal y directa. Aunque el número de granos por individuo se determina principalmente durante la fijación de las vainas (R3 a R6). Esto en parte se debe a que el cultivo sigue floreciendo una vez aliviado el estrés hasta R5, con una menor tasa de aborto de flores y vainas (Andrade et al., 2000a).

### 2.5.3. Producción de materia seca

La producción de materia seca (MS) del cultivo es función de la cantidad de radiación solar incidente, de la proporción de ésta que es interceptada y de la eficiencia de conversión de dicha radiación interceptada (Martignone et al., 2010). En soja la mayor



acumulación de MS vegetativa se produce poco después de R5,5 mientras que los valores máximos de MS reproductiva se alcanzan a comienzos de R7, momento en que también se obtienen los mayores valores de MS total (Mondino y Gómez, 2006).

Mondino y Gómez (2006) en ensayos conducidos en Santiago del Estero, con la variedad A 4910 RG, sembrado el 09/09/02 obtuvieron como máximos volúmenes de producción de MS los registrados en R7, de 14,6 ton.ha<sup>-1</sup> con distanciamientos entre hileras de 0,35 m. En la misma línea, la producción de MS en ensayos conducidos en EEA Balcarce sin limitantes hídricas y nutricionales con la variedad Ax 3127, sembrado a principios de noviembre, con 30 plantas.m<sup>-2</sup> fue de 12 ton.ha<sup>-1</sup> (Andrade y Sadras, 2000b).

De esta misma manera, Giménez (2014a) logró una acumulación máxima de MS en R6 de 8.347 y 16.168 kg.ha<sup>-1</sup> para dos años consecutivos, sin limitantes hídricas y adjudica la diferencia a la reducida radiación solar incidente a causa de los excesos de PP en el primer año. Estos datos son iguales a los presentados por Giménez (2012), en los que en los años 2010-2011 y 2011-2012 la producción de MS total fue de 16.000 kg.ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, estudios llevados a cabo por Karam et al. (2005) evidenciaron que la acumulación de MS de soja aumentó a lo largo del ciclo y alcanzó en las plantas bien irrigadas un total de 14.100 kg.ha<sup>-1</sup> en el estadio R7, mientras que, a la cosecha, la acumulación de MS disminuyó debido a la defoliación y alcanzó 12.240 kg.ha<sup>-1</sup>.

A su vez, Martignone et al. (2010) determinaron que en general hubo una alta asociación entre el tamaño de las plantas, medido tanto como acumulación de MS e IAF, y el número de granos. Estas asociaciones están resaltando la importancia del tamaño de los canopeos en los procesos de intercepción de la radiación solar incidente y su transformación en MS de cultivo.

La producción de biomasa de un cultivo en una estación de crecimiento se maximiza cuando las plantas se encuentren expuestas a una alta amplitud térmica. Esto se debe a que son necesarias temperaturas diurnas óptimas para la fotosíntesis y temperaturas nocturnas que reduzcan respiración y retrasen el desarrollo prolongando los días de aprovechamiento de la radiación (Andrade y Sadras, 2000b).

## 2.6. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO

### 2.6.1. Deficiencias hídricas

La alta variabilidad interanual del clima determina que en términos generales las PP que ocurren en el periodo estival no satisfacen la demanda atmosférica en el promedio de los años (Sawchik, 2012). La disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de la brecha entre el rendimiento potencial y el obtenido a nivel comercial (Giménez et al., 2014c). Sin embargo, la magnitud de la respuesta a las

deficiencias hídricas depende de la intensidad, la duración y el estadio en que se producen estas (Andriani et al., 1991).

La diferencia entre la evapotranspiración de cultivo (ETc) y la evapotranspiración real (ETr) de cada año corresponde al déficit hídrico acumulado en la temporada. Esta diferencia para una serie histórica de años tomó valores en promedio para soja de 218 y 198 mm en Colonia y Salto, respectivamente. Esa limitación en la ETc por deficiencias hídricas produce disminución de la producción (García, s.f.).

La disponibilidad hídrica de los cultivos de verano está determinada por la influencia de tres factores relacionados a la oferta y a la demanda de agua para los cultivos, siendo: la estación de crecimiento limitada por las temperaturas, esto determina que las etapas de mayor jerarquía en la determinación del rendimiento se ubiquen en los meses de mayor demanda atmosférica. Asimismo, la capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) en la mayoría de los suelos es relativamente baja en relación al consumo de los cultivos, la misma puede cubrir entre el 20 y 30 % del consumo, esta limitante de los suelos genera una gran dependencia de las recargas hídricas (Giménez y García Petillo, 2011). Molino y Califra (2001) indican que la mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura en el país presentan una CAAD que varía entre 80 y 160 mm.

A su vez la recarga de agua en los suelos del país proviene casi exclusivamente de las PP y el régimen de estas posee como característica principal la variabilidad, tanto en volumen como en intensidad, y en general no cubren las demandas atmosféricas en las etapas críticas de determinación del rendimiento (Giménez et al., 2014c). La disponibilidad hídrica durante el PC en condiciones de secano depende principalmente de la ocurrencia de PP antes y durante la etapa (Giménez y García Petillo, 2011).

En condiciones de que el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción de agua será igual a la ETc. A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, esta será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo este por debajo de cierto valor umbral, el agua no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comienza a sufrir estrés (Allen et al., 2006).

El déficit hídrico afecta al crecimiento y el rendimiento de soja a través de su acción sobre la fotosíntesis y la fijación biológica del nitrógeno. En verano, al acentuarse el déficit hídrico en el suelo con el paso de los días sin lluvia, la fijación biológica cae antes que las fotosíntesis (Sinclair, 1986). El crecimiento es producto de la división y la expansión celular, siendo ambos sensibles al déficit hídrico, la ocurrencia del mismo en etapas vegetativas tendrá un efecto marcado sobre la expansión foliar y consecuentemente sobre el IAF del cultivo. Las plantas adecuan rápidamente la dimensión de la superficie transpirante a la disponibilidad hídrica, regulando la pérdida de agua por reducción de la

cantidad de radiación incidente interceptada. Además, en el corto plazo, es posible reducir el área expuesta a la radiación solar sin afectar el IAF, a través del movimiento foliar, y en caso que el déficit hídrico se incremente el proceso de reducción del área transpiratoria se intensifica a través de la senescencia foliar (Dardanelli et al., 2003).

Rodríguez et al. (s.f.) en experimentos realizados en Entre Ríos obtuvieron un aumento en la producción de MS a cosecha, entre los tratamientos sin y con deficiencias hídricas de 55%. La disminución en la producción de MS en cultivos bajo estrés hídrico puede deberse a una reducción en la interceptación de radiación y/o una disminución en la eficiencia de conversión (ec) de la radiación interceptada en biomasa (Andrade y Sadras, 2000b). De igual forma, Kantolic (2003b) afirma que la eficiencia de interceptación, está condicionada principalmente por el IAF, y que la ec está relacionada con la fotosíntesis neta del cultivo, pero de ambas eficiencias, la eficiencia de interceptación es fuertemente afectada por la disponibilidad de agua y nutrientes. El flujo transpiratorio está relacionado con la fijación de CO<sub>2</sub> ya que la radiación solar es la fuente de energía para ambos procesos y los flujos de ambos gases tienen resistencias en común. Por consiguiente, bajo condiciones favorables para la absorción de agua, cuanto más energía absorbe un canopeo, más agua puede transpirar y más CO<sub>2</sub> puede fijar (Dardanelli et al., 2003).

El momento de ocurrencia de una deficiencia hídrica es importante, porque con una misma intensidad de deficiencia el efecto sobre el rendimiento será distinto según el estadio del cultivo (Andriani, 2002). Las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre la fructificación avanzada y el llenado de granos, etapas entre R4 y R6, es decir el periodo 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 y García Petillo, 2011). Por lo tanto, los efectos de estreses serán tanto más negativos cuanto mayor sea su incidencia (duración e intensidad) alrededor del PC por su efecto sobre el número de granos, principal determinante del rendimiento (Otegui, 2009). Kantolic et al. (2003a) afirman que las variaciones en el número de granos provocadas por variaciones ambientales en general están estrechamente asociadas con cambios en el rendimiento, siendo menos robusta la relación entre el peso de los granos y el rendimiento.

Andriani (2002) igualmente afirma que el periodo R5-R7 es el más crítico en la determinación del rendimiento de soja, el estrés produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de granos por vaina y del peso de granos. Las deficiencias hídricas severas en esta etapa pueden producir pérdidas de rendimiento muy importantes (40% o más). A su vez Giménez et al. (2014c) en experimentos realizados en Paysandú, obtuvieron que con restricciones en el PC (entre las etapas R4 y R6) el rendimiento bajó entre un 50 y un 44%. En soja sequías posteriores a R6 afectan principalmente el peso de

los granos mientras que aquellas que ocurren entre R5 y R6 afectan principalmente el número de granos (Andrade y Sadras 2000b, Kantolic et al. 2003a).

Giménez (2014a) concluyó que además de las restricciones en la radiación presentes en el año 2009-10 durante el PC debido a las abundantes PP, se sumaron las deficiencias hídricas, las cuales afectaron aún más la interceptación de la radiación solar incidente y en consecuencia las TCC y los granos fijados. Estas condiciones permitieron que el bajo número de granos dispusiera de carbohidratos suficientes para obtener un alto peso promedio de grano sin diferencias entre los tratamientos con y sin deficiencias hídricas. Aunque en el año 2010-11, si hubo diferencias significativas en el peso de los granos entre los tratamientos con y sin deficiencias hídricas durante el PC, siendo mayor en los primeros. Esto se explicó porque este componente del rendimiento es residual, es decir se determina después que se fijó el número de granos. Por lo tanto, cuando el número de granos fijados es elevado, los fotoasimilados para la etapa de llenado de granos pueden no ser suficientes para obtener un peso de granos alto.

Andriani et al. (1991) obtuvieron resultados que indican que cuando se dan deficiencias en el periodo R1-R4 y se reestablece el estatus hídrico del cultivo en R4-R6, se da una menor competencia de asimilados entre las vainas lo cual permite que se fijen más granos por vainas y que estos granos sean más pesados en comparación a situaciones sin deficiencias hídricas en todo el cultivo. La menor susceptibilidad en rendimiento del primer periodo a las deficiencias hídricas se le puede atribuir a la plasticidad en la floración y al periodo de formación de vainas, que permitió la producción de nuevas flores y la disminución en el aborto de flores y vainas, y por lo tanto se produjeron vainas con más granos y más pesados cuando las deficiencias se dieron solo en R1-R4 que el control sin deficiencias hídricas, aunque el número de vainas con respecto a este fue menor.

Frederick et al. (2001) obtuvieron resultados que indican que reducciones en la fuerza de la fuente disminuyen la TCC entre los estadios R1 y R5, resultando en disminuciones en el número de vainas y de granos por unidad de área y en el rendimiento. Este es el periodo en el que se produce el mayor crecimiento de las ramificaciones. Por lo cual, estos autores sugieren que el déficit hídrico entre inicios de floración e inicios de llenado de los granos disminuye el rendimiento, principalmente debido a una disminución en el crecimiento vegetativo de las ramificaciones, lo cual resulta en un menor número de granos y un menor rendimiento en estas, lo que afecta negativamente el rendimiento total.

Andriani (2002) concluye que en el periodo R1-R5 el cultivo es más susceptible a las deficiencias hídricas que en el periodo anterior, ya que intensidades medias pueden producir reducciones en el rendimiento del orden del 10% y las deficiencias hídricas severas un 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 los granos, si cesan las deficiencias hídricas en la etapa siguiente. Por otro lado, Karam et al. (2005) obtuvieron disminuciones en la producción de MS de 16 % cuando se impuso

estrés hídrico durante dos semanas en R2, pero sin embargo no se encontraron diferencias significativas en el número de granos por planta ni en el peso de los granos. Esto sugiere que la detención del riego en la etapa de plena floración, puede ser beneficioso para realizar un ahorro del agua cuando esta es un recurso limitante.

En cambio, con deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa y en la floración, el número de granos por superficie fue elevado, no obstante, se presentó una tendencia a presentar un menor número de granos y pérdidas de rendimiento entre un 15 y 23 % con respecto a situaciones sin deficiencias hídricas durante todo el ciclo, sin diferencias estadísticas, debido a que fueron afectados con deficiencias hídricas durante la floración, ya que se constató que las deficiencias en la etapa vegetativa no fueron de significación. Por tanto, la floración es una etapa de mayor susceptibilidad que la etapa vegetativa, sin embargo, el número de granos definitivo en soja se determina en el PC (Giménez et al., 2014c). Giménez (2014a) concluye que esto se debe a que la floración es una etapa de desarrollo extensa, de más de 20 días de duración, asimismo la especie produce un número de flores superior al que concreta, esto permite que exista cierta compensación ante situaciones de estrés generadas en la etapa de floración.

Andriani (2002) concluye que entre emergencia y floración deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50% de AD) no producen reducciones en el rendimiento, si bien pueden disminuir el IAF y la altura de la planta. Sin embargo, intensidades mayores (20-40% de AD) podrían producir reducciones en rendimiento del orden del 10%. Giménez (2014b) menciona que la soja con deficiencias hídricas en la etapa vegetativa tiene posibilidades de compensar en las etapas previas al PC entre R1 y R3. Por otra parte, Andrade y Sadras (2000b) afirman que existe una buena correlación entre la TCC en el PC y el número de granos. Por esta razón, las deficiencias hídricas durante los ENC que pueden reducir la expansión foliar y la fotosíntesis, afectaran el rendimiento si estas reducciones en crecimiento temprano persisten y afectan el crecimiento en el PC. En caso contrario las deficiencias hídricas tempranas tienen efectos mínimos sobre el rendimiento.

## 2.7. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO

El consumo de agua de los cultivos es el valor de la evapotranspiración acumulada en todo su ciclo y depende de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo y del área foliar desarrollada por éste (Gerster y Bacigaluppo, 2009). El consumo de agua de los cultivos comprende el agua transpirada por las plantas y la evaporada directamente del suelo (Andriani, 2002). Según Otegui (2009), la proporción correspondiente a cada una varía con el IAF y con el contenido de humedad del horizonte superficial.

Casi toda el agua transpirada por un cultivo pasa a través de la superficie de sus hojas, de tal manera que a medida que aumenta el IAF, aumenta linealmente el consumo de agua para una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el 95 % de la radiación

solar. A partir de ese valor, por más que se incremente el IAF, el consumo de agua por transpiración se estabiliza y la evaporación se hace mínima (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

La cantidad de agua transpirada por un cultivo en ausencia de restricciones hídricas depende esencialmente de la cantidad de radiación solar (RS) interceptada por su canopeo y la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de la RS que llega a la superficie del suelo (Dardanelli et al., 2003). En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la evapotranspiración ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la evapotranspiración ocurre como transpiración. La tasa de transpiración es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo (Allen et al., 2006).

La demanda atmosférica determina la cantidad de agua que requiere un cultivo de soja para su máxima producción; la misma dependerá de la RS incidente, de la temperatura, de la humedad relativa del aire y del viento. Al aumentar, la planta de soja evapotranspira una mayor cantidad de agua, hasta un cierto límite fijado por el potencial de agua de sus hojas (Andriani, 2002). La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) para cada localidad y época del año, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares dan lugar a diferentes niveles de evapotranspiración en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>) se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (Allen et al., 2006).

La relación ET<sub>c</sub>/ET<sub>o</sub> que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), se utiliza para relacionar la ET<sub>c</sub> a la ET<sub>o</sub> de manera que  $ET_c = K_c \times ET_o$ . El K<sub>c</sub> cambia desde la siembra hasta la cosecha debido a las variaciones en las características del cultivo durante los diferentes periodos de crecimiento. La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de la ET<sub>o</sub>. Por lo tanto, mientras la ET<sub>o</sub> representa un indicador de la demanda climática, el valor del K<sub>c</sub> varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del K<sub>c</sub> entre distintas áreas geográficas y climas (Allen et al., 2006).

Asimismo, Otegui (2009) menciona que el  $K_c$  adquiere valores cercanos o superiores a 1 durante las etapas de máxima cobertura del suelo. En la mayoría de las especies de interés, estas etapas suelen coincidir con los períodos más asociados a la determinación del rendimiento. De esta manera Della Maggiora et al. (2000) determinaron que el comienzo del periodo con  $K_c > 1$  coincidió aproximadamente con el 80% de intercepción de la RS. La soja presentó valores de  $K_c$  máximos de 1,08 (desde R3 a R5), permaneciendo con  $K_c > 1$  entre R2 y R6, es decir el 38% del ciclo del cultivo.

Otros factores que se deben considerar al evaluar la  $ET_c$  son la cobertura del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo (Allen et al., 2006). Cuando las condiciones de campo difieran de las condiciones estándar, son necesarios factores de corrección para ajustar la  $ET_c$  ( $ET_c$  aj). Estos factores de ajuste reflejan el efecto del ambiente y del manejo cultural. Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. La  $ET_c$  aj se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) o ajustando el  $K_c$  a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales para la  $ET_c$  (Allen et al., 2006).

El consumo de agua de los cultivos, cuando la cantidad de agua disponible para las plantas (AD) se encuentra por encima de un umbral crítico, está determinado por una tasa de transpiración cercana a la que establece la demanda atmosférica. Cuando el AD está por debajo de dicho umbral, la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber el agua del suelo (Dardanelli et al., 2003). La absorción de agua que puede realizar un cultivo bajo condiciones limitantes de agua depende de factores del suelo, como el AD y la conductividad hidráulica; del cultivo, como la densidad y profundidad de las raíces, la conductancia hidráulica de los tejidos vasculares, la capacidad de ajuste osmótico, y de la intensidad de la demanda (Otegui, 2009).

Allen et al. (2006) aseguran que los contenidos de humedad por encima de la capacidad de campo (CC) no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y son drenados, y que los contenidos de humedad por debajo del punto de marchitez permanente (PMP) no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas. Por tanto, el total de AD en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a CC y el PMP. Según Otegui (2009) estos límites, pero no tanto la cantidad de AD, varían considerablemente con la textura del suelo. Los valores típicos de AD están en el rango de 130-140 mm por metro de perfil, excepto en suelos arenosos donde el AD alcanza sólo unos 80 mm.

A pesar de que en teoría existe AD hasta alcanzar el PMP, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el PMP. A medida que disminuya el AD, esta será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más

difícil de extraer por el cultivo. Cuando el AD esté por debajo de cierto valor umbral, esta no podrá ser transportada hacia las raíces para satisfacer la demanda transpiratoria (Allen et al., 2006). 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, se le conoce como umbral de riego (UR). Este punto también se puede expresar como el porcentaje máximo de agotamiento del AD para no sufrir estrés (p). El UR y el “p” dependen del cultivo, de su etapa de desarrollo, del tipo de suelo y de la demanda atmosférica (García, 2012). La fracción del AD total que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable (Allen et al., 2006).

De este modo, el consumo de agua y el crecimiento de los cultivos se reduce cuando el AD en la zona explorada por las raíces se encuentra por debajo del 40-60%, siendo los valores más bajos de este rango, correspondientes a situaciones previas a floración en las que las raíces crecen en profundidad explorando estratos húmedos, y a bajas demandas atmosféricas (Dardanelli et al., 2003). De forma similar, Andriani (2002) menciona que sólo el 50% del AD es fácilmente extractable. El 50% restante es utilizado por la planta bajo condiciones de estrés hídrico, cada vez más intenso a medida que disminuye el AD. Por lo tanto, el límite de estrés hídrico está fijado en el 50% del AD del suelo explorado por las raíces. Bidegain (2012) reporta datos similares, el cual indica que los mayores rendimientos estuvieron asociados a disponibilidades hídricas mayores a 40% durante el período desde siembra a R3 y mayores al 60% durante el periodo R3-R6.

La capacidad de las raíces de los cultivos para extraer agua depende de la distribución y profundidad de su sistema radical. Las raíces de las plantas de soja tienen una gran capacidad exploratoria a través del perfil de suelo, aunque la mayor densidad se encuentre en los primeros centímetros del mismo (Gerster y Bacigaluppo, 2009). Además, Dardanelli et al. (2003) mencionan que la fracción de AD que se puede extraer será máxima cuando no existan limitantes para la distribución uniforme de las raíces y se haya alcanzado una densidad crítica en la capa. El suelo es el único reservorio de agua que dispone la planta; el volumen de suelo explorado por las raíces es el que determina la cantidad de agua potencialmente disponible para el cultivo (Andriani, 2002).

La transpiración es el término del balance de agua que está directamente ligado con la fotosíntesis, y por consiguiente con el crecimiento (Dardanelli et al., 2003). De la misma manera, el rendimiento está estrechamente asociado con la transpiración y fijación del CO<sub>2</sub>. Los mayores niveles de irradiancia, que determinan mayor fijación de CO<sub>2</sub>, también implican un aumento de la demanda evaporativa, que con buena provisión hídrica se traduce en mayores consumos de agua (Otegui, 2009).

#### 2.7.1. Exigencias hídricas y consumo de agua por el cultivo

La disponibilidad de agua es importante principalmente en dos periodos de desarrollo, en germinación-emergencia y en floración-llenado de granos. Durante el



primer periodo tanto el exceso como la falta de agua es perjudicial para el establecimiento del cultivo y la obtención de una buena uniformidad en la población de plantas, siendo el exceso hídrico más limitante que el déficit (Farias et al., 2007). La germinación comienza cuando la semilla ha absorbido el 50% de su peso en agua bajo condiciones ambientales adecuadas (Sadras et al., 2000). Las necesidades de agua van aumentando con el desarrollo de la planta, alcanzando el máximo durante floración-llenado de granos (7-8 mm.día<sup>-1</sup>), decreciendo después de ese periodo (Farias et al., 2007).

La evapotranspiración de soja varía entre 300 mm y 800 mm, dependiendo del clima, los suelos, la variedad de cultivo y las prácticas de manejo. Un uso estacional del agua de 330 mm a 760 mm ha sido reportado en Estados Unidos, y valores similares en Australia (Wani et al., 2012). Allen et al. (2006) presentaron valores entre 450 y 825 mm. La ETc máxima diaria en soja es de aproximadamente 8-9 mm.día<sup>-1</sup>, la cual normalmente ocurre mientras se alcanza el IAF máximo (cerca de la plena floración hasta el inicio del llenado de las vainas) (Wani et al., 2012). Della Maggiora et al. (2000) determinaron para Balcarce una ETc de 454 mm con el cultivar Asgrow 3205, con una máxima media diaria de 7,6 mm.día<sup>-1</sup>. A su vez, Rodríguez et al. (s.f.) obtuvieron una ETc de 533 mm en Entre Ríos. Giménez y García Petillo (2011) modelaron un rango de variación de las ETc para el litoral oeste en las diferentes situaciones agroclimáticas de 455 a 836 mm.

El consumo potencial de agua de los cultivos está determinado básicamente por la energía incidente proveniente de la RS, el periodo de exposición a la misma y las características del cultivo (Giménez y García Petillo, 2011). A su vez, Farias et al. (2007) mencionan que su valor puede variar, tanto en función de las condiciones climáticas de cada región, como en función del año o de la época de siembra. En este sentido, Giménez y García Petillo (2011) obtuvieron que la ETc estimada presentó variabilidad entre años, destacándose los años «Niña» y «Niño» con los mayores y los menores valores respectivamente, la respuesta estuvo asociada inversamente a las PP. Los valores simulados de ETc en soja de GM IV fueron de 567 mm para Colonia y de 509 mm para Salto, mientras que para el GM VI presentaron valores de 627 y 641 mm, respectivamente.

El GM tiene un efecto importante en la ETc total (a mayor duración del ciclo mayor es la ETc total), aunque la fecha de siembra es de mayor significación en la reducción de la ETc (Otero et al., 2015). Las necesidades de agua en soja de primera y de segunda época de siembra para la región sojera núcleo varían de 450 a 650 mm y de 350 a 550 mm, respectivamente (Andriani, 2002).

En condiciones de campo la ETc aj puede ser menor que la ETc debido a condiciones no óptimas y se suele llamar ETr (Allen et al., 2006). La ETr estima el consumo de agua de los cultivos que ocurre en las situaciones reales de campo en condiciones de secano y es un factor con escasas posibilidades de manejo, ya que es determinada principalmente por la demanda atmosférica, la ocurrencia de PP, la CAAD de los suelos y las características morfo-fisiológicas del cultivo. Las estimaciones de las

ETr fueron sustancialmente menores que las ETc en la mayoría de las situaciones agroclimáticas y tuvieron una mayor variabilidad entre años. Asimismo, en Salto se presentaron menores diferencias entre las ETc y las ETr que en Colonia (Giménez y García Petillo, 2011). Prieto Angueira et al. (2016) en Santiago del Estero obtuvieron que en fecha de siembra óptima la ETr fue superior que en la fecha de siembra tardía (592 y 391 mm, respectivamente) debido a la mayor duración del ciclo y la mayor ETo promedio.

Rosadi et al. (2005) encontraron que el déficit hídrico afectó la evapotranspiración. De igual manera Giménez (2014a) obtuvo un menor consumo de agua con deficiencias hídricas en comparación a situaciones con bienestar hídrico y esto disminuyó el rendimiento. Giménez y García Petillo (2011) obtuvieron que los valores simulados de ETr en soja de GM IV fueron de 352 mm para Colonia y de 360 mm para Salto, mientras que para el GM VI presentaron valores de 409 para Colonia y de 443 para Salto.

Giménez (2012) reportó que en el periodo R1-R6 el consumo varió de 66 a 69% del consumo total. Entre R1 y R6 ocurren las etapas más importantes en la determinación del rendimiento y la ETc es proporcionalmente elevada. La ubicación temporal del PC en soja depende del GM y de la fecha de siembra. En GM medios (V y VI) que son los más utilizados en el país y en fechas de siembra de noviembre, el PC se ubicó principalmente durante febrero. Las etapas de mayor consumo de agua (R1-R3), en esas condiciones, ocurrieron principalmente en enero que es el mes de máximas demandas. A su vez, Karam et al. (2005) obtuvieron que el 65 % de la ETc se produjo en R3-R5. Sin embargo, Giménez (2014a) para Paysandú obtuvo que el PC mostró una duración de 28 a 32 días y el consumo de agua en ese período varió entre 30 y 38 % de la ETc total.

### 2.7.2. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso del agua (EUA) de un cultivo puede ser definida en distintas escalas. De manera general, esta es definida como el rendimiento o producción de MS por unidad de agua consumida (Micucci, 2004). La producción final de un cultivo se encuentra estrechamente asociada al consumo hídrico del mismo. La relación entre estas variables define la EUA (Otegui, 2009). La misma varía entre especies, debido a su tipo de metabolismo C3 o C4, composición de la biomasa, y a las características del uso del agua, variando también entre climas que condicionan la demanda atmosférica (Micucci, 2004).

La dependencia de la EUA de las condiciones climáticas y del manejo del cultivo, genera un amplio rango de EUA para cultivos con adecuada provisión de agua (Della Maggiora et al., 2000). Esto se debe a que la EUA es modificada por todas aquellas variables que afectan el rendimiento del cultivo y/o el consumo del mismo. En relación al manejo del cultivo Otero et al. (2015) mencionan que el GM es más importante que la fecha de siembra en la EUA por el cultivo, siendo que, a mayor GM, menor EUA.

Las buenas prácticas agronómicas deben derivar la mayor cantidad de agua hacia la transpiración del cultivo, ya que es la única pérdida de agua productiva. En efecto, la producción de MS es proporcional a la transpiración, y todas las otras vías de disminución del AD constituyen pérdidas que disminuyen la eficiencia agronómica en el uso del agua, es decir los kilos de grano por cada milímetro de agua (Micucci, 2004).

Vilche y Costanzo (2011) con la información de rendimiento y el consumo de agua calcularon la EUA en  $8,8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Della Maggiora et al. (2000) en Balcarce, obtuvieron una EUA de  $9,1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$  en promedio, con valores máximos y mínimos de 5 y  $11 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ , respectivamente.

Los déficits hídricos durante los PC de los cultivos producen marcadas reducciones en el número de granos y por lo tanto en el rendimiento y en la EUA (Andrade y Caviglia, 2015). En este sentido Micucci (2004) en experimentos en Córdoba Argentina obtuvo EUA en el rango de  $3,8$  a  $7,4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$  en la medida que el rendimiento aumentó de  $2087$  a  $3478 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectivamente. Karam et al. (2005) obtuvieron sin limitantes hídricas una EUA de  $4,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ , aumentando un 13 y 4 % con deficiencias hídricas en R2 y R7, respectivamente. Sin embargo, las deficiencias hídricas en R5, disminuyeron la EUA un 17 % comparado al control sin limitantes hídricas.

## 2.8. RIEGO

### 2.8.1. Manejo del agua de riego

Varios estudios conducidos sobre un amplio rango de ambientes han demostrado que el rendimiento de soja aumenta con el riego (Doss et al., 1974). En el mismo sentido, Caraballo de Silva (1990) afirma que un manejo adecuado del riego en soja exige conocimientos no sólo del contenido de humedad del suelo y del nivel de agotamiento que pueda permitir de esa humedad, sino que también debe tomarse en cuenta la etapa de crecimiento del cultivo, debido a que la soja varía en cuanto a sus necesidades hídricas y en su sensibilidad al exceso o al déficit de agua, según el estadio de desarrollo.

El riego no debe comenzar demasiado temprano, debido a que durante la etapa vegetativa las plantas pueden ser estresadas un poco, ya que de otra manera se desarrollará un sistema radicular superficial (Specht, 2001). La mayoría de las raíces se encuentra en los 0,3 m superiores del suelo, pero los períodos prolongados de sequía ocasionan que las raíces proliferen en mayor grado hacia capas del suelo más profundas, aumenten la relación entre raíces y tallos, y tienden a incrementar la longitud total de las raíces (Wani et al., 2012). Capurro (2016), evidenció extracción de agua por parte del cultivo hasta 1 m de profundidad cuando tuvo deficiencias hídricas en etapas tempranas que estimularon una mayor exploración radicular. En condiciones de deficiencias hídricas se puede verificar una mayor participación de los horizontes profundos en el consumo total de agua del cultivo, que varía a su vez con la conductividad hidráulica de cada uno (Otegui, 2009).

Klocke et al. (1989) hicieron una prueba con cultivares de soja indeterminada en Nebraska, estos autores indican que la soja debe ser regada según sus estadios de crecimiento. De esa forma, se le debe dar atención a la capacidad de retención de agua del suelo, a los factores climáticos y el sistema de riego. Estos autores recomiendan que en las zonas de producción más cálidas y secas el riego debe ser aplicado desde el inicio de la etapa vegetativa para alcanzar la demanda evaporativa, mientras que en las áreas húmedas puede ser retrasado hasta la floración. Pero hasta en este último caso el suelo debería tener una buena CAAD y debe llenarse hasta CC antes de la siembra.

Allen et al. (2006), señalan que el factor “p” varía de un cultivo a otro, variando normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ETc ( $> 8 \text{ mm.día}^{-1}$ ), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ETc ( $< 3 \text{ mm.día}^{-1}$ ). Un valor de 0,50 de “p” con demandas moderadas de ETc ( $= 5 \text{ mm.día}^{-1}$ ) es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos, entre ellos la soja.

Referido a esto, Rosadi et al. (2005) mencionan que el riego completo normalmente se programa para mantener el agua del suelo por encima del contenido de agua crítico ( $q_c$ ), el cual se calcula de la siguiente forma:  $q_c = CC - p(CC - PMP) (\text{m}^{-3}\text{m}^{-3})$ . Allen et al. (2006) definen la ETc aj cuando el contenido de AD está por debajo del  $q_c$  ( $ETc_{aj} = K_s ETc$ ) siendo  $K_s$  de suma importancia para la planificación del riego deficitario, ya que según Rosadi et al. (2005) permite conocer la ETc aj.

Además, García (2012) expresa que regar bien es darle a las plantas la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, es decir, antes que el AD les genere un estrés que disminuya su rendimiento. Pero esta cantidad adecuada de agua debe aplicarse de forma uniforme en toda la parcela, cuanto más desuniforme sea la aplicación, mayor será el volumen de agua aplicado para que toda la parcela quede bien regada.

### 2.8.2. Riego suplementario

En regiones húmedas y sub húmedas, el riego ha sido usado para suplementar las lluvias como una medida táctica durante las sequías para estabilizar la producción, esta práctica ha sido llamada riego suplementario, utilizando cantidades de agua en función de los niveles relativos de lluvia, con la meta de maximizar el rendimiento y eliminar las fluctuaciones causadas por las deficiencias hídricas (Debaeke y Aboudrare, 2004). Las condiciones climáticas uruguayas con lluvias irregulares a lo largo del ciclo del cultivo provocan períodos de sequía que pueden lograr una importante disminución del rendimiento. El riego suplementario permite reducir el déficit hídrico en períodos particulares del cultivo, aumentando el rendimiento y la estabilidad (Otero et al., 2015).

Garside et al. (1992) reportaron que la tasa de crecimiento de todos los componentes de la planta aumenta con riegos más frecuentes, que la senescencia era

retrasada y que el IAF era retenido más tarde en la estación de crecimiento de soja. Estos mismos autores señalan que la mayor variación en el rendimiento era explicada por la cantidad total de agua (lluvia + riego) recibida por el cultivo, con un incremento total de  $7 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$  de agua. Estos resultados sugieren que la cantidad de lluvia recibida durante la estación de crecimiento fue insuficiente y que el riego suplementario fue requerido para obtener niveles de rendimiento más altos. A partir de los resultados de este estudio se pudo concluir que el manejo del agua en soja es un tema de importancia en las regiones húmedas. También se encontró que había diferencias genotípicas con respecto a la EUA, resaltando la importancia de la elección del cultivar como una llave para alcanzar rendimientos óptimos con un reducido uso de agua para riego suplementario.

Grasso y Montero (2011) afirman que las diferencias en el número de granos entre situaciones con y sin riego se le atribuye a la reducción en la TCC durante el PC debido a las deficiencias hídricas, por lo tanto, la baja disponibilidad de agua no solo afectó el rendimiento sino también la acumulación de MS. Por otro lado, Sweeney y Granade (2002) reportaron un incremento en el rendimiento con la aplicación de riego durante R1-R2, en R4 o en R6; ellos sostienen que los riegos en R1-R4 tienen un efecto positivo en el número de granos; los riegos en R6 tienen efecto en el peso de los granos.

### 2.8.3. Riego deficitario

Según Sincik et al. (2008) si el agua de riego es un recurso limitado o costoso será mejor utilizarlo con algún método de riego deficitario (RD), en algunos casos sacrificando parte del rendimiento potencial. En la misma línea Fereres y Soriano (2007), señalan que, para hacer frente a los escasos suministros, el RD definido como la aplicación de agua por debajo de los requerimientos de los cultivos ( $E_{Tc}$ ), es una herramienta importante para lograr reducir el uso de agua, quienes aseguran que el principal objetivo no debería ser el de maximizar la producción por unidad de área sino por unidad de agua.

El principal acercamiento a una práctica de RD consiste en incrementar la EUA del cultivo mediante la provisión parcial de los requerimientos de riego y permitiendo el estrés hídrico planeado durante uno o más periodos de la temporada de crecimiento con el menor impacto en el rendimiento del cultivo. La capacidad de retención de agua del suelo debe ser considerada para asegurar el éxito del RD. En suelos arenosos las plantas pueden sufrir estrés hídrico rápidamente bajo RD, mientras que en suelos profundos de textura fina las plantas pueden tener tiempo suficiente para ajustarse a la baja presión del suelo, y pueden permanecer inalteradas por el bajo contenido de AD en este. Por lo tanto, el éxito del RD es más probable en suelos de textura fina (Kirda, 2002).

Rosadi et al. (2005) aseguran que cuando el AD es igual o mayor al qc la  $E_{Tr}$  es igual a la  $E_{Tc}$ , pero si este es menor el coeficiente  $E_{Tr}/E_{Tc} < 1$ , y la planta comienza a estresarse. James, citado por Rosadi et al. (2005) plantea que, si el suelo se encuentra entre

la CC y el qc, a cualquier contenido de AD dentro de este rango, el rendimiento debe ser mayor al esperado si el contenido de AD se encuentra entre el qc y el PMP.

Candoğan y Yazgan (2016) en experimentos de RD obtuvieron valores máximos de IAF en el estadio de la formación de vainas. El IAF fue significativamente afectado por el RD en todas las etapas de crecimiento, con los valores más altos de IAF observados con riego completo en la etapa de crecimiento de vainas (7,41) y los valores más bajos sin riego en la etapa de crecimiento vegetativa (2,81).

Fereres y Soriano (2007) afirman que no sólo la producción de MS está relacionada con la transpiración, sino que el rendimiento de muchos cultivos también lo está, por lo que el diseño de un programa de RD debe basarse en el conocimiento de esta respuesta, no obstante, esta respuesta varía con la ubicación, patrones de estrés, cultivar, fechas de siembra y otros factores. En particular, muchos cultivos tienen diferentes sensibilidades al estrés hídrico en diversas etapas de desarrollo, y el programa de RD debe diseñarse para manejar el estrés de modo que se minimice el declive del rendimiento, cuando la disminución del rendimiento, en términos relativos, es menor que la disminución de la ETc y la EUA en RD aumenta con respecto al riego completo. Por lo tanto, la sincronización del déficit hídrico apropiadamente es una herramienta para programar el riego donde hay un suministro limitado de agua (Moutonnet, 2002).

Según Doorenbos y Kassam (1979) es necesario derivar la relación entre la disminución del rendimiento relativo y el déficit de evapotranspiración relativa, con el fin de cuantificar el efecto del estrés hídrico, la cual está comprendida en la siguiente ecuación:  $1 - Y_a / Y_c = K_y (1 - ET_{c\ aj} / ET_c)$ , donde  $(1 - Y_a / Y_c)$  es la disminución en el rendimiento relativo,  $(1 - ET_{c\ aj} / ET_c)$  es la disminución de la evapotranspiración relativa y el  $K_y$  es el factor de respuesta del rendimiento. El  $K_y$  de soja para todo el período de crecimiento bajo déficit hídrico fue de 0,85. El  $K_y$  del cultivo da una indicación de la tolerancia del cultivo al estrés hídrico (Kirda, 2002).

La misma cantidad de agua aplicada en momentos diferentes tuvo distintas consecuencias en el rendimiento. El RD con el 50 % de la evapotranspiración desde siembra hasta R4 no repercutió en el rendimiento si en el PC se riega con el 100 % de la demanda del cultivo, pudiendo ser esta una estrategia válida para manejar el riego en las condiciones climáticas del Uruguay, pudiendo ahorrar hasta un 22 % de agua respecto a satisfacer la demanda completa durante todo el ciclo del cultivo (Capurro, 2016).

A su vez Neyshabouri y Hatfield (1986) afirman que la práctica de retrasar el inicio del riego durante las primeras etapas del cultivo puede resultar en una mejora en la EUA de riego, mayormente debido a la eliminación del riego durante los estadios vegetativos cuando la evaporación desde el suelo es la principal causa de pérdida de agua. Candoğan y Yazgan (2016) observaron el mayor rendimiento ( $4004 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) con riego completo, seguido del RD75% en vegetativo ( $3910 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y del RD50% en vegetativo

(3889 kg.ha<sup>-1</sup>), estos resultados indicaron que el rendimiento de soja no fue afectado por el RD durante la etapa vegetativa, pero el rendimiento se redujo significativamente cuando se aplicó RD durante la floración, la formación de vainas o el llenado de granos.

En relación a los componentes del rendimiento Candoğan y Yazgan (2016) registraron que el mayor número de vainas por planta se observó en situaciones de riego completo y el menor número de vainas fue determinado en condiciones de secano con valores para esta variable de 57 y 23, respectivamente. El aumento del déficit hídrico en cada etapa de crecimiento, especialmente en el período de crecimiento de los granos, resultó en disminuciones significativas en el número de vainas por planta. El mayor número de granos por planta se observó también en condiciones de riego completo con 159, mientras el menor valor se observó en condiciones de secano con 62. Estos resultados indicaron que el déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo resultó en disminuciones significativas en el número de granos por planta. Los autores sostienen que excepto para el período de llenado de granos, las deficiencias hídricas del 25% en cada etapa de crecimiento produjeron un número similar de granos por planta, mientras que, el menor peso de granos se observó con el 75% de déficit hídrico en el llenado de granos (123 g).

Prieto Angueira et al. (2016) para un ambiente semiárido de Argentina determinaron que el RDC T75% destacó entre los tratamientos, ya que su ETr y su rendimiento fueron menores o iguales que los de BH T100%, sin diferencias significativas entre estos. El rendimiento no disminuyó significativamente ( $p=0.05$ ) en el RDC T75% ni en el RDC T50% con respecto al BH T100%. Por el contrario, la productividad del agua de riego mostró diferencias significativas, siendo mayor con menos riego.

Sincik et al. (2008) afirman que el rendimiento aumentó a medida que aumentó la cantidad de riego, mientras que los valores de la EUA disminuyeron cuando aumentó la cantidad de riego. Trout et al. (2010) señalan que la EUA de riego es relativamente baja en sistemas de riego completo, mostrando el potencial beneficio para el agricultor de transferir el agua a usos de mayor valor.

De esta forma, Trout et al. (2010) expresan que casi todo el aumento en la EUA aplicada con RD es el resultado de un uso más efectivo de las PP y el aumento del uso del agua almacenada en el suelo, o inversamente la menor EUA del riego completo es debida al ineficiente aprovechamiento de las lluvias y del riego. Andrade y Caviglia (2015) mencionan que para aumentar la eficiencia de utilización de los recursos-insumos es necesario aumentar la captura de los recursos-insumos y/o la eficiencia de uso de los recursos-insumos capturados.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se desarrolló durante el ejercicio agrícola 2015-16 en el campo experimental de riego de la estación experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) perteneciente a la Facultad de Agronomía, la cual se encuentra sobre ruta 3, km 363, del departamento de Paysandú, Uruguay (32°22' S 58° 2'42.11"O). Dicho ensayo se llevó a cabo sobre un suelo clasificado como Brunosol subéutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1000000, estando incluido dentro de la formación Fray Bentos (Durán et al., 1976).

Cuadro 1. Características hidrológicas del suelo

Horizonte	Profundidad (cm)	Dap (gr.cm <sup>-3</sup> )	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1.25	54	28	26
B	20-70	1.34	235	150	85
AB	0-70		289	178	111

Dap: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CAAD: capacidad de almacenaje de AD

##### 3.1.1. Manejo experimental

El ensayo se sembró el 16 de noviembre de 2015, las parcelas presentaron una dimensión de 5 m de largo x 2 m de ancho y estuvieron compuestas por 5 surcos sembrados a 0,4 m. El cultivar fue DM 4915 IPRO STS (HC indeterminado, Intacta, resistente a diferentes especies de lepidópteros, tolerante a sulfonilureas). La población objetivo fue de 350.000 plantas.ha<sup>-1</sup>, la cual se logró ajustadamente. El ensayo estuvo libre de malezas, enfermedades, plagas y deficiencias nutricionales. Se realizaron dos aplicaciones de glifosato para el control de malezas una en preemergencia del cultivo (4 lt.ha<sup>-1</sup> de producto comercial el 18/11/2015) y otra en postemergencia del cultivo (2,5 lt.ha<sup>-1</sup> de producto comercial el 9/12/2015). La fertilización fosfatada se realizó con superfosfato simple (400 kg.ha<sup>-1</sup> el 7/12/2015) con el objetivo de corregir fósforo y azufre que eran los elementos limitantes, el análisis de suelo indicó que el potasio se encontraba en valores de baja probabilidad de respuesta. En relación al control de plagas se realizaron dos aplicaciones de Engeo (tiametoxan + lambda cialotrina) a razón de 200 cc.ha<sup>-1</sup> de producto comercial en cada aplicación, las mismas fueron realizadas el 27/01/2016 y el 11/03/2016, con el objetivo de controlar chinches (*Piezodorus guildinii* y *Nezara viridula*).



Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos

Fecha	Estadio fenológico	Días post emergencia
16/11/2015	Siembra	
25/11/2015	Emergencia	0
01/01/2016	R1	37
05/01/2016	R2	41
03/02/2016	R4	70
24/02/2016	R6	91
07/03/2016	R7	103
01/04/2016	R8	128

Para la aplicación de la metodología experimental se utilizó la escala fenológica para soja de Fehr y Caviness (1977). Se consideró el periodo entre R4-R6 como el periodo crítico (PC) para la determinación del rendimiento.

### 3.1.2. Tratamientos

BH: bienestar hídrico durante todo el ciclo (contenido hídrico de 60% de agua disponible (AD) en el suelo o superior durante el PC y 40% de AD o superior durante las ENC (etapas no críticas).

RDC.PC: riego deficitario controlado en el PC (50% de la lámina neta de riego aplicada al tratamiento con BH en cada evento de riego durante el PC y contenido hídrico entre 20 y 40% de AD durante las ENC).

RDC.V-PC: riego deficitario controlado en la etapa vegetativa y en el PC (50% de la lámina neta de riego aplicada al tratamiento con BH en cada evento de riego durante la etapa vegetativa y en el PC y contenido hídrico entre 20 y 40% de AD entre las etapas R1 y R4).

RDC.Rep.: riego deficitario controlado en el periodo reproductivo (50% de la lámina neta de riego aplicada al tratamiento con BH en cada evento de riego durante las etapas entre R1 y R6 y contenido hídrico entre 20 y 40% de AD en la etapa vegetativa).

RD50%BH: riego deficitario durante todo el ciclo (50% de la lámina neta de riego aplicada al tratamiento con BH en cada evento de riego durante todo el ciclo).

Las parcelas estuvieron limitadas externamente por una “ronda” de 0,2 m de altura construida en tierra, a modo de impedir la entrada de agua proveniente del

escurrimiento. El tratamiento RDC.PC del bloque 1, no fue incluida en el análisis debido a que el 23/12/2015 se registró un evento de PP que no pudo ser interceptado.

Los tratamientos de RD se lograron a través de dos intervenciones en la disponibilidad hídrica del cultivo, la primera fue la utilización de simuladores de sequía parcelarios con el objetivo de interceptar las PP en las parcelas con deficiencias hídricas planificadas. Los mismos consistían en carpas con estructuras de acero colocadas sobre las parcelas en forma permanente y con lonas impermeables corredizas. Los simuladores tenían forma de túnel disponiendo de una puerta delantera y una trasera. Las dimensiones de los simuladores fueron de 2 m de altura x 2 m de ancho x 5 m de largo, las lonas fueron corridas sobre las parcelas con deficiencias hídricas inmediatamente antes de cada evento de PP y retiradas inmediatamente después de finalizado el evento, intentando no modificar sustancialmente las condiciones de RS, ni generar cambios en las temperaturas que pudieran alterar el desarrollo del cultivo.

La segunda intervención consistió en la utilización de riego a través de un sistema de goteo con cintas dispuestas en cada hilera. Los goteros presentaron un caudal nominal de  $1,49 \text{ l h}^{-1}$  y se encontraban distribuidos en las cintas cada 0,2 m. El objetivo del riego fue mantener los niveles de agua disponible en el suelo dentro de los rangos indicados. Para determinar la lámina de riego a aplicar diariamente en los tratamientos con BH y RD se utilizó la metodología de balance hídrico de suelos (BHS) simplificado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta H_2O = R \text{ efectivo} + PP \text{ efectiva} - ETc$$

Siendo  $\Delta H_2O$  = variación del agua en el suelo, R= agua de riego aplicada (mm), PP= precipitaciones (mm) y ETc= evapotranspiración de cultivo (mm), calculada mediante el método  $ETc = ET_o \times Kc$ , donde la  $ET_o$  es la evapotranspiración del cultivo de referencia y el  $Kc$  es el coeficiente del cultivo. La  $ET_o$  se calculó utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith y los  $Kc$  recomendados por FAO para soja (Allen et al., 2006).

Para el caso de los tratamientos sometidos a RD, la ETc se sustituye con la ETc aj (evapotranspiración de cultivo ajustada), calculada según proponen Allen et al. (2006) como  $ETc \text{ aj} = ET_o \times Kc \times Ks$ , siendo el  $Ks$  = coeficiente de estrés hídrico calculada según proponen Allen et al. (2006) como  $Ks = (ADT - Dr) / (1-p) ADT$ , siendo ADT = agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm), Dr = agotamiento de humedad en la zona radicular (mm), p = fracción del ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico. Si el  $Ks$  calculado es mayor a la unidad,  $Ks=1$ , y de lo contrario el  $Ks$  es igual al calculado.

### 3.1.3. Agua de riego y precipitaciones para cada tratamiento

En el cuadro 3 se puede observar el volumen de riego aplicado a cada tratamiento en las distintas etapas fenológicas. La lámina neta del RD50%BH fue el 55% de la suministrada en el BH, por lo cual cabe indicar que el tratamiento RD50%BH recibió 13 mm más que el riego planificado en el periodo R1-R4, debido a problemas en el sistema de riego.

Cuadro 3. Riego aplicado en las distintas etapas fenológicas para cada tratamiento

Tratamiento	Riego (mm) E-R1	Riego (mm) R1-R4	Riego (mm) R4-R7	Riego (mm) total
BH	52	195	39	286
RDC.PC	0	0	20	20
RDC.V-PC	26	20	20	65
RDC.Rep.	0	98	20	117
RD50%BH	26	111	20	156

BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario en periodo crítico

En el RDC.PC se interceptaron las PP del periodo comprendido entre el 2/12/2015 y el 2/2/2016, en el RDC.V-PC las del periodo comprendido entre el 4/1/2016 y el 2/2/2016 y en el RDC.Rep. las del periodo comprendido entre el 2/12/2015 y el 4/1/2016. Esto mismo se puede apreciar en el cuadro 4, donde las diferencias en las PP mensuales entre tratamientos se encuentran en los meses de diciembre y enero. En diciembre se interceptaron 121 mm de los 125 mm precipitados, en los tratamientos RDC.PC y RDC.Rep. En enero se interceptaron 18 mm de los 21 interceptados, en los tratamientos RDC.PC y RDC.V-PC.

Cuadro 4. Precipitaciones mensuales registradas (mm.mes<sup>-1</sup>)

PP	BH	RDC.PC	RDC.V-PC	RDC.Rep.	RD50%BH
Noviembre	23	23	23	23	23
Diciembre	125	4	125	4	125
Enero	21	3	3	21	21
Febrero	243	243	243	243	243
Marzo	87	87	87	87	87
Total	499	360	481	378	499

BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario en periodo crítico

## 3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

### 3.2.1. Hipótesis biológica

La aplicación de estrategias de riego deficitario en diferentes etapas fenológicas del cultivo de soja permite obtener rendimientos similares al potencial mejorando la eficiencia del uso del agua obtenida en condiciones de BH.

### 3.2.2. Diseño experimental

El diseño utilizado fue un DBCA (diseño en bloques completos al azar), con tres bloques y cinco tratamientos.

$$\text{Modelo: } Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

$Y_{ij}$ : rendimiento en  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

$\mu$ : media poblacional del rendimiento.

$\alpha_i$ : efecto del  $i$ -ésimo tratamiento.

$\beta_j$ : efecto del  $j$ -ésimo bloque.

$\epsilon_{ij}$ : error experimental asociado al  $i$ -ésimo tratamiento en el  $j$ -ésimo bloque.

Siendo:  $i$ : 1, 2, 3, 4, 5

$j$ : 1, 2, 3

## 3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

### 3.3.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

Se elaboraron los BHS, en los que se estimó las pérdidas y ganancias de agua en el suelo. De esta manera se estimó el consumo de agua de cada tratamiento.

La evolución del IAF se midió semanalmente con un ceptómetro (AccuPAR LP-80 de Decagon Devices Inc.), con el fin de relacionar el AD de cada tratamiento con las distintas evoluciones en el IAF producto de las deficiencias hídricas en distintas etapas del cultivo. Además, con el ceptómetro también se obtuvo el porcentaje de RS incidente interceptada. De las medidas semanales de esta, se realizaron interpolaciones lineales para obtener el porcentaje de RS incidente interceptado diario para toda la estación de crecimiento, el cual se utilizó en conjunto con los valores diarios de RS incidente

obtenidos de la estación meteorológica de la EEMAC para el cálculo de la RS interceptada.

Se realizaron dos muestreos de MS en la etapa reproductiva, siendo estos correspondientes a los estadios R4 y R7 (Fehr y Caviness, 1977), se cortó al ras del suelo 1 m lineal de plantas por parcela, estas muestras fueron colocadas en estufa a una temperatura de 60 °C hasta que mantuvieran el peso constante. Los muestreos tuvieron como objetivo evaluar la evolución de la acumulación de biomasa aérea, y además fueron utilizados para determinar la TCC entre los estadios R4-R7. El muestreo a R4 fue realizado el 3/02/16 y en R7 el 7/03/16.

### 3.3.2. Determinaciones a cosecha

La cosecha de los ensayos se realizó de forma manual. Para estimar los componentes de rendimiento se cosecharon 2 metros lineales de plantas en el centro de la parcela para eliminar el efecto borde, y de estos se cuantificó el número de plantas, el número de vainas por planta, el número de vainas con 4, 3, 2, 1 grano/s por vaina por planta, y el número de granos por planta.

Además, para determinar el rendimiento en grano se cosecharon 7 metros lineales de plantas los que junto a los 2 metros anteriores se utilizaron para cuantificar el % de humedad, el peso de mil granos y el rendimiento.

El rendimiento por unidad de área se corrigió a la humedad comercial de 13%.

## 3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico Infostat 2016, con este se realizaron:

### 3.4.1. Análisis de la varianza

Mediante el análisis de la varianza se descompone la variación total en tantos componentes como tenga el modelo.

### 3.4.2. Pruebas de comparación múltiple

Se realizaron pruebas de comparación múltiple (Tukey), al 5 % de significancia para las variables: MS acumulada a R4 y R7 ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), IAF a R4 y R7, RS interceptada a R1, a R4, a R7, en PC y en el periodo reproductivo temprano (R1-R4), rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), vainas.planta<sup>-1</sup>, granos.planta<sup>-1</sup>, peso de 1000 granos (g) y EUA ( $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}$ ).

Se realizaron pruebas de comparación múltiple (Tukey), al 10 % de significancia para las variables TCC en R4-R7 ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ ) y número de granos. $\text{m}^{-2}$ .

### 3.4.3. Análisis de correlación

Se analizaron las variables de interés, de forma de obtener una medida de la magnitud de asociación entre las variables, mediante el coeficiente de Pearson. El análisis de correlación se efectuó para las siguientes variables: relación entre el IAF y el porcentaje de intercepción de RS, relación entre el rendimiento y el número de granos. $\text{m}^{-2}$ , relación entre el rendimiento y el peso de 1000 granos (g), relación entre la RS interceptada en el PC y el número de granos. $\text{m}^{-2}$ , relación entre IAF a R4 y la RS interceptada en R4-R6 (MJ) y relación entre en rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y el IAF a R4.

## 3.5. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

### 3.5.1. Precipitaciones

En la figura 1, se puede observar las PP mensuales registradas durante el ciclo del cultivo mediante un pluviómetro ubicado en el sitio experimental y los valores promedio mensuales del período histórico 1961-1990, para la localidad de Paysandú (datos proporcionados por INUMET, 2016).

En la temporada 2015-16 las PP fueron un 82% del promedio histórico 1961-1990, siendo los meses de diciembre y febrero en los que se registraron PP sensiblemente mayores al promedio, mientras que en noviembre, enero y marzo ocurrió lo contrario ya que las lluvias fueron de menor magnitud que los valores históricos (figura 1). Las PP ocurridas en el mes de noviembre en el cual se realizó la siembra del cultivo correspondieron al 19% de las registradas en el promedio histórico 1961-1990, no obstante, todos los tratamientos fueron regados hasta el estadio V2 para asegurar una emergencia y un establecimiento uniforme del cultivo.

En el mes de diciembre se produjo la mayor parte del crecimiento vegetativo del cultivo el cual coincidió con PP levemente superiores al promedio histórico, situación que se revirtió en enero en donde el cultivo atravesó el comienzo del periodo reproductivo sujeto a una alta demanda atmosférica, sumado a PP por debajo de la media, correspondiente al 21% de la misma (figura 1). El PC para la determinación del rendimiento (R4 a R6) se ubicó durante el mes de febrero el cual se caracterizó por presentar PP 85% superiores a los registros históricos para dicho mes (figura 1).

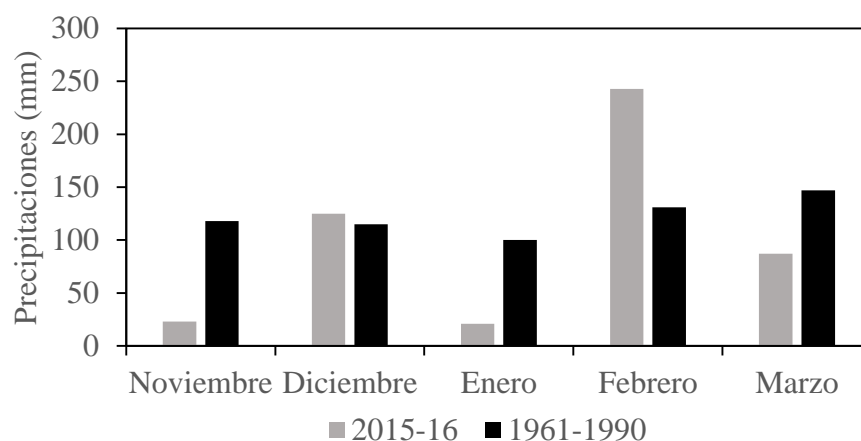


Figura 1. Precipitaciones ocurridas durante 2015-16 y valores promedio de la serie histórica 1961 a 1990 (elaborado en base a datos proporcionados por el INUMET, 2016)

### 3.5.2. Radiación solar incidente

En la figura 2 se puede observar la RS incidente del período 2002-15 y la RS registrada durante la temporada del ensayo. Se aprecia que la RS incidente para el ciclo del cultivo es muy similar a la RS incidente para el promedio de los años 2002-15, con excepción de enero y febrero donde la misma fue levemente superior a la media. Para enero esto podría explicarse por las escasas PP ocurridas en dicho mes lo que podría determinar un bajo número de días nublados; en cambio en febrero ocurre que a pesar de que las PP fueron muy superiores al promedio histórico, las mismas ocurrieron en su mayoría en solo 5 eventos, y estos fueron los únicos que lograron disminuir la RS incidente por debajo de  $22 \text{ MJ.m}^{-2}\text{.día}^{-1}$ .

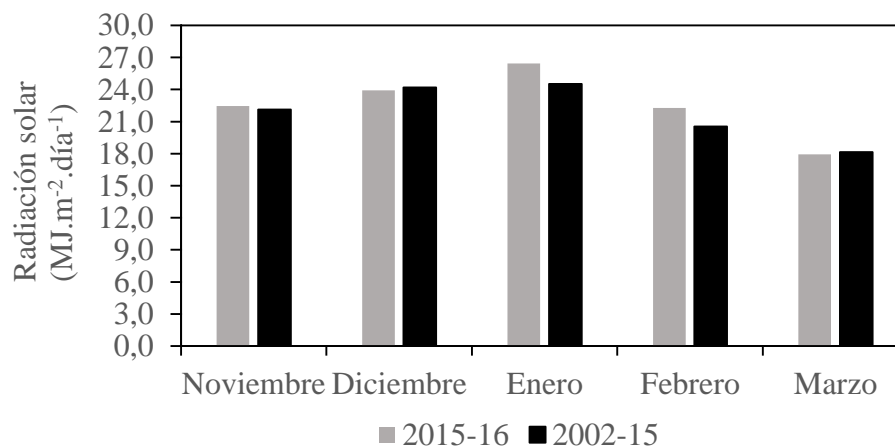


Figura 2. Radiación solar ( $\text{MJ.m}^{-2}\text{.día}^{-1}$ ) media diaria mensual durante el año agrícola 2015-16 y de la serie histórica 2002-15 (ambas obtenidas de la estación meteorológica automática de la EEMAC, Facultad de Agronomía)

### 3.5.3. Temperatura

En la figura 3 se pueden observar las temperaturas medias diarias para los distintos meses que abarcó el ciclo del cultivo en 2015-16 y la serie histórica 2002-15. La temporada 2015-16 presentó una temperatura media diaria mayor que la serie histórica en enero y febrero, siendo mayores en este último mes 1,6 °C que la serie. Para los meses de noviembre y marzo la temperatura media diaria de la temporada 2015-16 se encontró 1 °C por debajo de la serie histórica.

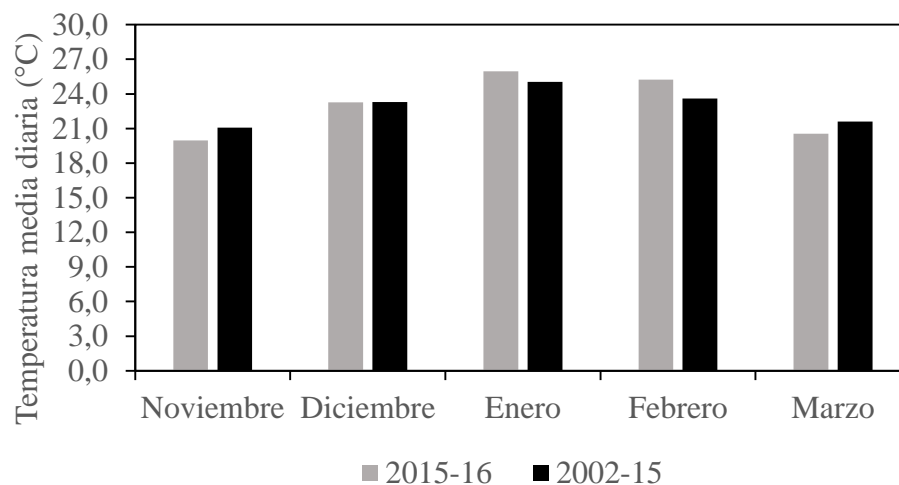


Figura 3. Temperatura media diaria (°C) ocurrida durante el año agrícola 2015-16 y valores promedio de la serie histórica 2002-15 (ambas obtenidas de la estación meteorológica automática de la EEMAC, Facultad de Agronomía)

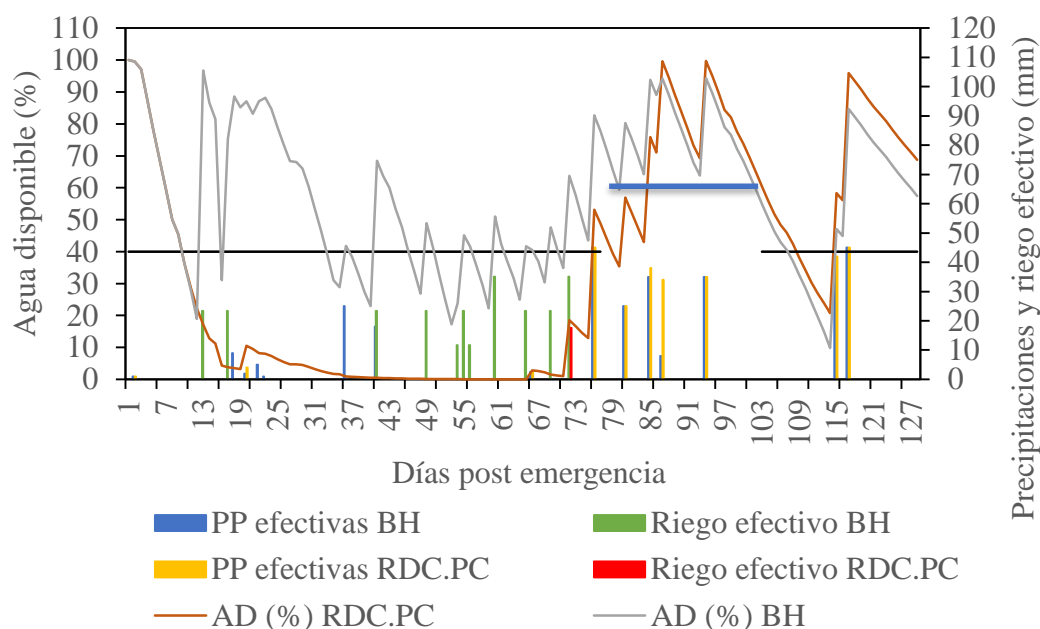


## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

#### 4.1.1. Evolución del agua disponible en el suelo

En la figura 4 se puede observar el AD para el BH y el RDC.PC, se aprecia que para el BH el AD se encontró por encima del 40 % en la mayor parte de las ENC y por encima del 60 % en el PC. En el BH existieron cortos periodos en que el AD se encontró por debajo del umbral crítico en ENC, aunque según Andrade y Sadras (2000b) las deficiencias hídricas tempranas tienen efectos mínimos sobre el rendimiento. De acuerdo a Bidegain (2012), que indica que los mayores rendimientos estuvieron asociados a disponibilidades hídricas mayores a 40% durante el período desde siembra a R3 y mayores al 60% durante el periodo R3-R6, se puede asegurar que el BH se encontró en situación de confort hídrico durante todo el ciclo.



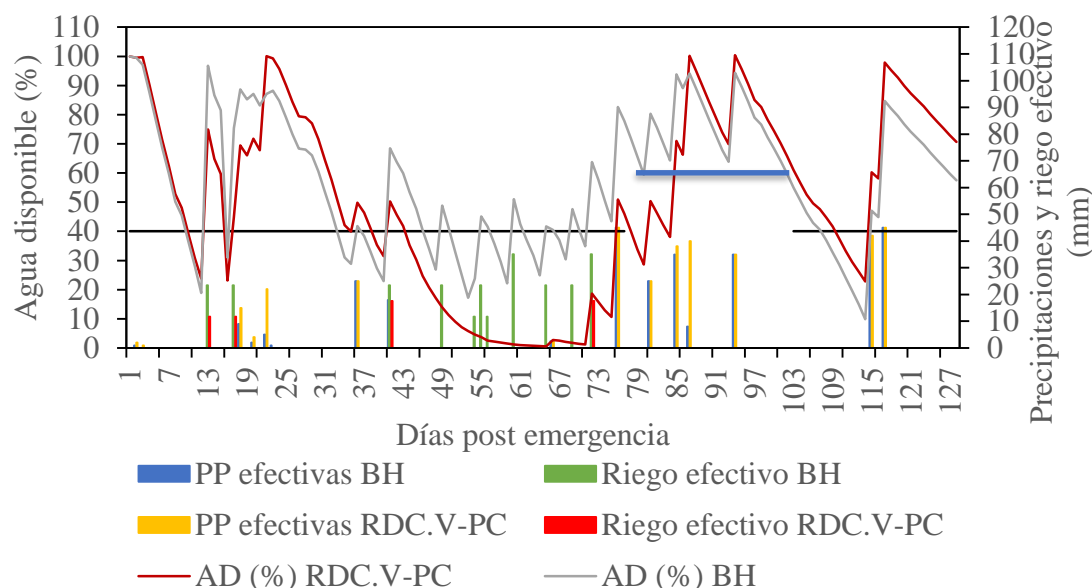
Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea azul para el periodo crítico (PC); las barras verticales indican las precipitaciones (PP) efectivas y el riego efectivo para los tratamientos BH y RDC.PC; BH=bienestar hídrico; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Figura 4. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RDC.PC en relación a los días post emergencia

El BH y el RDC.PC comenzaron el ciclo con un contenido hídrico cercano al 100% del AD producto del riego aplicado para garantizar la emergencia del cultivo y la población de plantas adecuada (figura 4). En el estadio V2 se establecieron los tratamientos, momento en cual en el RDC.PC se observó una caída del AD sostenida a

medida que avanzó el ciclo producto de la intercepción de las PP y la ausencia de riego hasta que se acercó el PC, donde el AD fue restituida por encima del 60%.

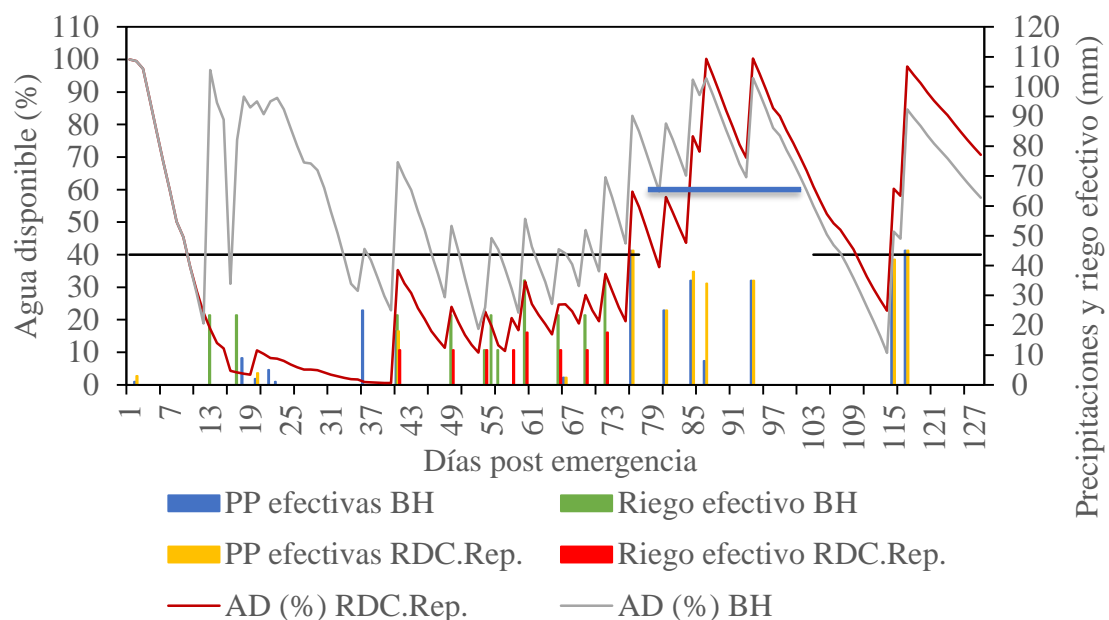
Cabe señalar que las magnitudes de las pérdidas de agua fueron sobrestimadas en los tratamientos sometidos a deficiencias hídricas, producto de la metodología utilizada para el cálculo del BHS, ya que en algunas etapas del ciclo las estimaciones indicaron contenidos de AD cercanos al 0 %.

En la figura 5 se presenta el AD para el BH y el RDC.V-PC. En ambos tratamientos el AD se mantuvo con valores superiores al umbral crítico durante la etapa vegetativa (40% de AD) debido al riego aplicado en este periodo. En el RDC.V-PC el AD empezó a disminuir sostenidamente a partir del estadio R1 hasta valores muy bajos en R2, los cuales en R4 ascendieron hasta alcanzar el umbral crítico de PC (60% de AD) en el estadio R4.5.



Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas, y la línea azul para el periodo crítico; las barras indican las precipitaciones (PP) efectivas y el riego efectivo para los tratamientos BH y RDC.V-PC; BH=bienestar hídrico; RDC.V-PC=riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico  
 Figura 5. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RDC.V-PC en relación a los días post emergencia

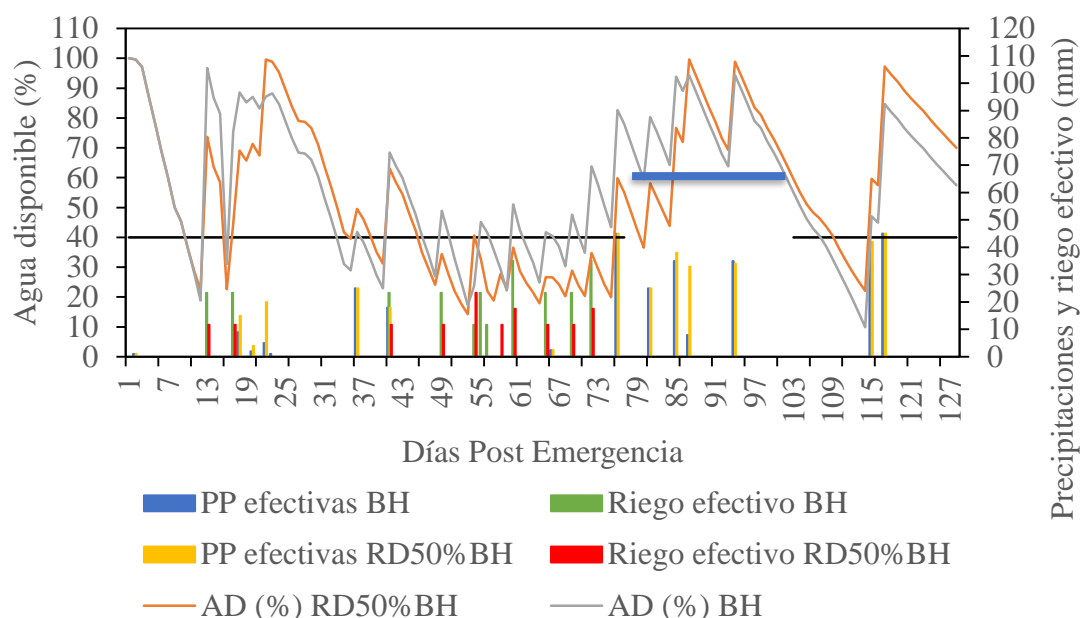
En la figura 6 se presenta el AD para el BH y el RDC.Rep. En este último se observó que luego de provocado el estrés hídrico en V2, el AD disminuyó sostenidamente hasta alcanzar valores inferiores al 10% hasta el estadio R1, donde aumentó y se mantuvo en el entorno del 20% de AD hasta el estadio R4. Por lo tanto, en el RDC.Rep. durante el periodo R1-R4 el cultivo fue sometido a estrés hídrico, aunque este fue de menor intensidad con respecto a la etapa vegetativa y al que fueron sometidos el RDC.PC y el RDC.V-PC en R1-R4. A partir de R4 el AD aumentó hasta el umbral crítico en PC.



Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea azul para el periodo crítico (PC); las barras indican las precipitaciones (PP) efectivas y el riego efectivo para los tratamientos BH y RDC.Rep; BH=bienestar hídrico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo  
 Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RDC.Rep. en relación a los días post emergencia

En la figura 7 se presenta el AD para el BH y el RD50%BH. Se observa que ambos presentaron comportamientos del AD muy similares. Esto se explicó debido a que en ninguno de los dos se interceptaron las PP durante todo el ciclo del cultivo. El AD se encontró muy por encima del umbral crítico durante la etapa vegetativa en ambas estrategias de riego. Las principales diferencias entre el AD del BH y el RD50%BH se registraron en el periodo R2-R4.5 (figura 7), lo cual se puede explicar debido a que los riegos aplicados en esta etapa fueron realizados con la mitad del volumen en el RD50%BH en comparación al BH y además las PP en este periodo fueron significativamente menores a la serie histórica 1961-1990 (INUMET, 2016), sumado a las mayores demandas atmosféricas. Ambas estrategias de riego presentaron AD por encima del umbral crítico en el PC.

La información presentada anteriormente permite concluir que los tratamientos sometidos a distintas estrategias de RD se encontraron bajo deficiencias hídricas severas en los periodos que se provocaron las deficiencias hídricas planificadas. En cambio, estos se encontraron bajo deficiencias hídricas moderadas o en confort hídrico en los periodos que fueron regados de manera deficitaria. Cabe recordar que todas las estrategias de RD evaluadas se encontraron en confort hídrico en casi la totalidad del PC.



Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea azul para el periodo crítico (PC); las barras indican las precipitaciones (PP) efectivas y el riego efectivo para los tratamientos BH y RD50%BH; BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo

Figura 7. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD %) para el BH y el RD50%BH en relación a los días post emergencia

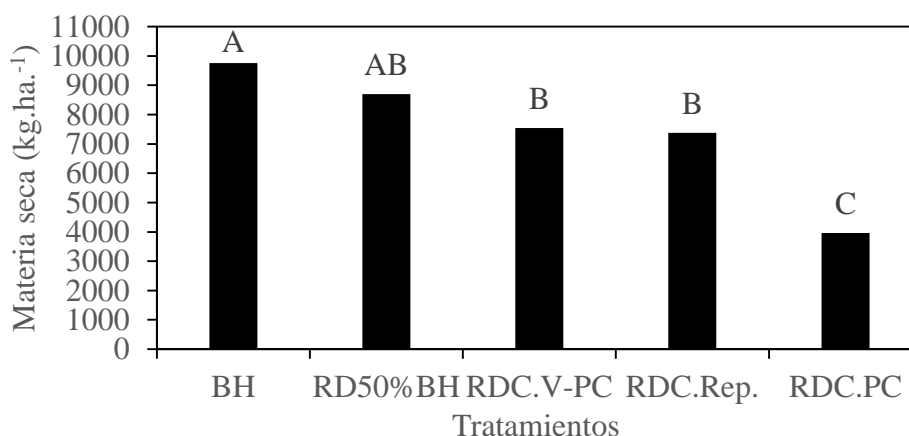
#### 4.1.2. Parámetros de crecimiento

##### 4.1.2.1. Producción de materia seca a inicios del periodo crítico

En la figura 8 se presenta la MS acumulada a R4 según la estrategia de riego. El BH acumuló la mayor cantidad de MS a inicios del PC con  $9.758 \text{ kg.ha}^{-1}$ , presentando diferencias significativas con el resto de los tratamientos a excepción del RD50%BH, el que acumuló el 92% de la MS con BH, es decir  $8.996 \text{ kg.ha}^{-1}$ . El RDC.PC acumuló la menor cantidad de MS a inicios del PC con  $4.533 \text{ kg.ha}^{-1}$ , es decir el 46% de la MS que con BH, siendo significativas las diferencias con el resto de las estrategias de riego (figura 8), debido a que presentó la mayor duración e intensidad de las deficiencias hídricas.

El RDC.V-PC y el RDC.Rep. no se diferenciaron del RD50%BH, pero si presentaron diferencias significativas con el BH acumulando el 77% y 76% de la MS de este a R4, respectivamente (figura 8). El RDC.V-PC, el RDC.Rep. y el RD50%BH presentaron deficiencias hídricas durante el periodo reproductivo temprano, aunque con distintas intensidades. Andriani et al. (1991) afirman que las sequías durante el periodo R1-R4 producen disminuciones significativas en la producción de MS vegetativa. Karam et al. (2005) obtuvieron disminuciones en la producción de MS de 16% cuando se impuso

estrés hídrico durante dos semanas en R2. Esta disminución fue mayor que la del RD50%BH debido a la menor intensidad del estrés en este último y fue menor que la del RDC.V-PC y el RDC.Rep., siendo en el primero debido a la mayor duración e intensidad del estrés en el periodo R1-R4 y en el segundo por la mayor duración de las deficiencias en este periodo y el efecto de las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa.



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Columnas con diferente letra difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Tukey)

Figura 8. Materia seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) acumulada a inicios del periodo crítico (R4)

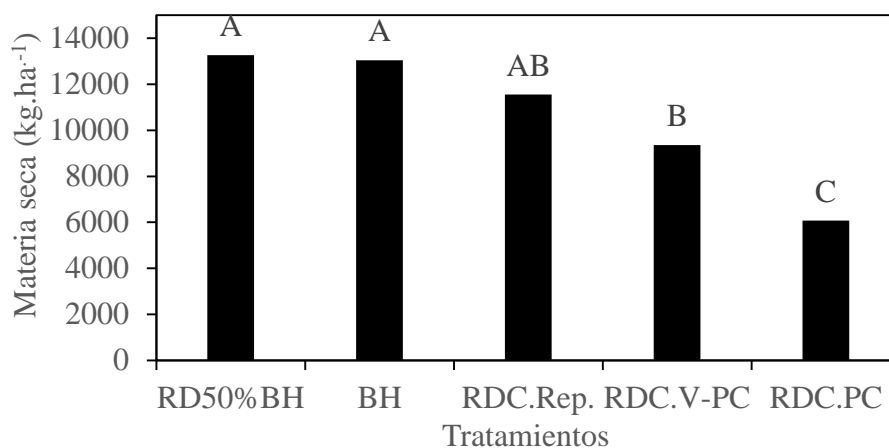
En base a estos resultados se pudo determinar que el RD50%BH fue el único tratamiento de RD que no encontró limitada la cantidad de MS acumulada a R4 por el hecho de haber suministrado el 50% del riego requerido para mantener el bienestar hídrico. Las deficiencias hídricas severas en el periodo vegetativo o reproductivo temprano, impactaron negativamente sobre la producción de MS a R4, y a su vez a mayor duración del estrés el efecto negativo fue mayor.

#### 4.1.2.2. Producción de materia seca a madurez

En la figura 9 se muestra la MS acumulada hasta la madurez del cultivo, es decir hasta el estadio R7. El BH y el RD50%BH presentaron la mayor acumulación de MS con 13.042 y 13.269  $\text{kg.ha}^{-1}$ , respectivamente, seguidos por el RDC.Rep. con el 89% de la MS del BH, sin diferencias significativas con este. Giménez (2014a) logró una acumulación máxima de MS sin limitantes hídricas en R6 de 8.347 y 16.168  $\text{kg.ha}^{-1}$  para dos años consecutivos, y adjudicó la diferencia a la RS incidente, la cual varió según la cantidad de PP. Por lo tanto, la diferencia entre la acumulación de MS obtenida por este autor y la obtenida en el presente ensayo pudo deberse a la RS incidente en cada temporada.

El RDC.PC presentó nuevamente la menor acumulación, con el 47% de la MS con BH en R7 (figura 9), diferenciándose significativamente del resto de las estrategias de riego. Rodríguez et al. (s.f.) reportaron resultados similares de aumento de producción

de MS a cosecha de 55% entre tratamientos sin y con deficiencias hídricas. El RDC.V-PC acumuló en R7 el 72% de la MS con BH, diferenciándose significativamente con este, lo cual se debió a que además de la menor acumulación de MS hasta R4 con respecto al BH, el RDC.V-PC produjo la menor cantidad de MS en el periodo R4-R7 (figuras 8 y 9).



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Columnas con diferente letra difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Tukey)

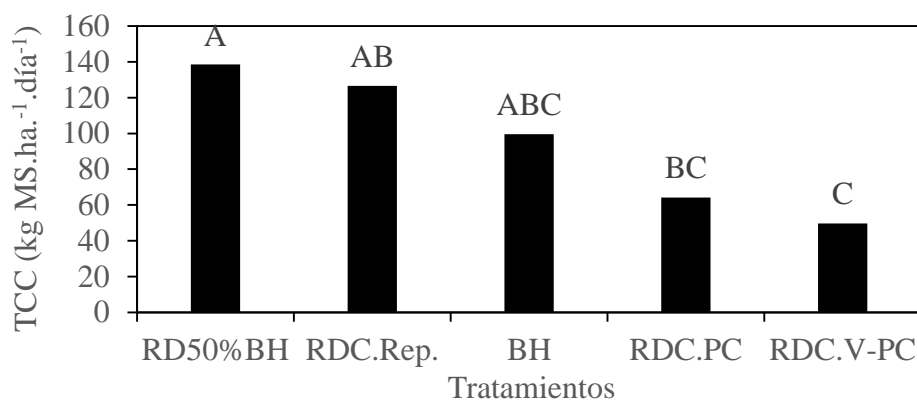
Figura 9. Materia seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) a madurez (R7)

Los resultados logrados permiten interpretar que la MS acumulada durante el periodo R4-R7 y la MS acumulada total tendieron a ser más afectadas por las deficiencias hídricas severas durante el periodo R1-R4 que por las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa. Esto probablemente se debió al HC indeterminado que presenta la soja (Toledo, 2016), lo que permite que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa tengan la capacidad de ser compensadas por nuevos crecimientos vegetativos luego de la floración en caso de que disminuya el estrés hídrico.

#### 4.1.2.3. Efecto del riego deficitario sobre la tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico

En la figura 10 se presenta la TCC en el periodo R4-R7, la que tendió a ser diferente entre tratamientos ( $p < 10$ ). El BH no presentó diferencias significativas en la TCC en R4-R7 con ninguna de las estrategias de RD, posiblemente debido al confort hídrico en que se encontraron todos los tratamientos durante el PC. El RDC.V-PC y el RDC.PC tendieron a presentar las menores TCC en el PC con 64 y 50  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ , respectivamente. Esto pudo deberse a que las deficiencias hídricas severas durante el periodo R1-R4 afectaron la capacidad de interceptar RS y la TCC durante el PC, ya que según Andrade y Sadras (2000b) el IAF disminuye ante situaciones de deficiencias hídricas y según Kantolic (2003b) la interceptación de la RS varía según el IAF del cultivo.

El RD50%BH presentó la mayor TCC en R4-R7, siendo esta de  $139 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$ , seguida del RDC.Rep. con un valor de  $127 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$ , seguido por el BH con  $100 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$  (figura 10). Estos datos coinciden con los reportados por Foster y Rovegno (2015), los que obtuvieron valores de 134, 115 y  $110 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$  para los tratamientos RD50%BH, RDC.Rep. y BH correspondientes a este trabajo, respectivamente. Por otro lado, estas TCC obtenidas en R4-R7 (figura 10) son inferiores a las obtenidas por Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013) los que reportaron, en la misma localidad y con el cultivar DM 5.1i, valores de TCC en R4-R6 en condiciones de BH de  $250 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$ .



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Columnas con diferente letra difieren entre sí ( $p < 0.10$ ; Tukey)

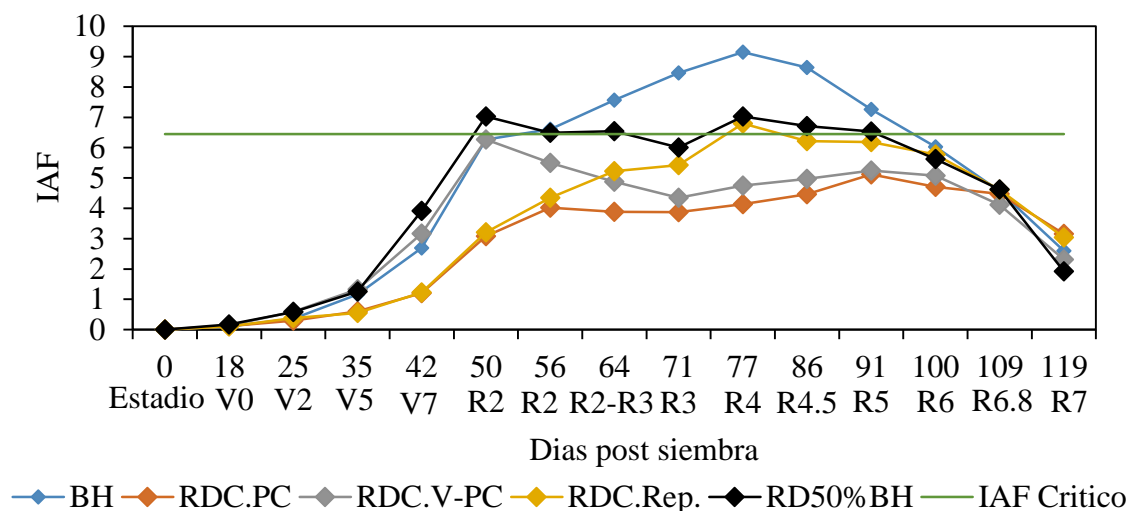
Figura 10. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en periodo R4-R7 ( $\text{kg MS.ha}^{-1}.\text{día}^{-1}$ )

#### 4.1.2.4. Efecto del riego deficitario sobre el índice de área foliar

En la figura 11 se presenta la evolución del IAF. En todos los tratamientos el IAF aumentó durante la etapa vegetativa, ya que como mencionan Andrade et al. (2000a) este varía con el estadio de desarrollo, ya que aumenta con la aparición de hojas y el crecimiento foliar. Las estrategias que recibieron riego en la etapa vegetativa (BH, RD50%BH y RDC.V-PC) presentaron un mayor IAF durante este periodo, alcanzando en R2 valores cercanos al IAF crítico (figura 11), debido a que estuvieron en confort hídrico. El RDC.PC y el RDC.Rep. presentaron el menor crecimiento del IAF durante la etapa vegetativa, alcanzando al final de esta etapa un IAF de 3,2; debido a que se encontraron bajo deficiencias hídricas severas. Candoğan y Yazgan (2016) en experimentos de RD obtuvieron los valores más bajos de IAF sin riego en la etapa vegetativo (2,8), lo cual según Dardanelli et al. (2003) se debe a que las deficiencias hídricas en las etapas vegetativas tienen un efecto marcado sobre la expansión foliar y sobre el IAF.

El BH continuó aumentando el IAF en el periodo R1-R4, llegando a alcanzar el máximo de 9,1 en R4 (figura 11). El RDC.Rep. en el periodo R1-R4 presentó aumentos de IAF similares al BH, dado por el restablecimiento del AD, aunque se mantuvo por

debajo del IAF crítico (figura 11). De igual manera Martignone et al. (2010) concluyeron que el estrés hídrico en la primera parte del ciclo determinó las diferencias en el crecimiento del IAF. El RD50%BH a pesar de tener la misma AD que el RDC.Rep. durante el periodo R2-R4 mantuvo su IAF sin crecimiento, aunque sobre el IAF crítico (figura 11), lo que se explicó según Andrade y Sadras (2000b), Dardanelli et al. (2003) debido a que las deficiencias hídricas provocan una menor expansión foliar.



La línea verde representa el IAF crítico calculado; BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico

Figura 11. Evolución del índice de área foliar (IAF) en función de los días post siembra

El RDC.V-PC presentó una disminución del IAF del 24% durante el periodo R1-R4 (figura 11) alcanzando un IAF de 4,8 en R4 (52 % del BH) producto de las deficiencias hídricas severas en este periodo. Karam et al. (2005) con deficiencias hídricas por dos semanas en R2, obtuvieron reducciones del IAF de un 52% comparado al que no presentó deficiencias hídricas alcanzando un valor de 4. Según Andrade y Sadras (2000b) esta reducción se debe primariamente a la menor expansión y/o a un aumento de la senescencia foliar. Por otro lado, el RDC.PC mantuvo el crecimiento del IAF durante el periodo R1-R4, a pesar de tener similar AD que el RDC.V-PC, aunque este aumento fue mucho menor al del RDC.Rep. y el BH, alcanzando un IAF de 4,1 en R4 (figura 11).

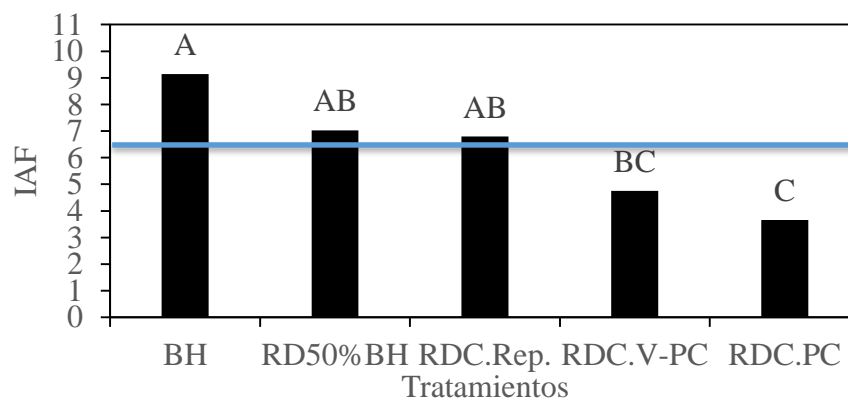
En el periodo R1-R4 con igual AD distintos tratamientos presentaron diferentes patrones de evolución del IAF, por lo cual unos se encontraron más estresados que otros (RD50%BH más que RDC.Rep, y RDC.V-PC más que RDC.PC). Este comportamiento puede deberse a una mayor adaptación a las deficiencias hídricas cuando las plantas son estresadas en etapas tempranas, posiblemente por un mayor crecimiento radicular, ya que según Specht (2001), Capurro (2016) las deficiencias hídricas en etapas tempranas estimulan una mayor extracción de agua de los horizontes profundos del suelo. También



Otegui (2009), Wani et al. (2012) obtuvieron similares resultados. Esto explicó porque los tratamientos que presentaron deficiencias en la etapa vegetativa aumentaron el IAF durante el periodo siguiente, aun encontrándose bajo deficiencias hídricas.

En la figura 12 se puede apreciar que a comienzos del PC se registraron diferencias significativas en cuanto al IAF alcanzado por cada una de las estrategias de riego. El RD50%BH y el RDC.Rep. no presentaron diferencias entre ellos ni con el BH, por lo que las deficiencias hídricas severas en el periodo vegetativo y moderadas durante el periodo R1-R4 no impidieron llegar al IAF crítico en R4. Esto se explicó debido a que según Toledo (2016) la soja presenta un HC indeterminado, lo que según Giménez (2014b) permite que las deficiencias hídricas en la etapa vegetativa tengan posibilidades de ser compensadas en el periodo R1-R3. Candoğan y Yazgan (2016) de distinta forma obtuvieron los valores máximos de IAF con riego completo en el estadio de formación de vainas (7,4), siendo significativamente afectado por el RD en todas las etapas del ciclo.

El BH evidenció una disminución del IAF durante el PC, del 34% con respecto al máximo alcanzado en R4 (figura 11), la cual no pudo ser explicada por deficiencias hídricas, ya que se encontró en confort hídrico. Esto podría deberse a que el BH presentó un IAF mucho mayor al crítico a inicios del PC, lo cual pudo haber provocado el sombreado y la senescencia anticipada de los estratos más bajos del follaje. Al respecto Sylvester, citado por Cardozo Romero (2008) mencionó que cuando el cultivo alcanza un IAF entre 5 y 8, este valor se estabiliza, debido a que las hojas superiores somborean a las inferiores en una magnitud tal, que la fotosíntesis de estas hojas es insuficiente para compensar la respiración de mantenimiento, por lo que se desencadena el envejecimiento y la caída de las hojas. Este fenómeno podría explicar porque la TCC en el PC con BH no presentó diferencias significativas con respecto a las estrategias de RD (figura 10).



La línea celeste indica el IAF crítico del cultivo (6,45); BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Columnas con diferente letra difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Tukey).

Figura 12. Índice de área foliar (IAF) en R4

El RDC.PC y el RDC.V-PC presentaron valores de IAF en R4 significativamente menores al BH y por debajo del crítico (figura 12), y no aumentaron el IAF durante el PC (figura 11). Karam et al. (2005) coincidiendo con esto no encontraron crecimientos del IAF luego de quitado el estrés en R5, lo que se atribuye a una baja capacidad de las plantas de recuperarse de las deficiencias hídricas en estadios tan avanzados. Por tanto, es necesario lograr el máximo IAF antes de llegar a R5 (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

La información presentada permite concluir que mantener el cultivo sin deficiencias hídricas severas (>20% de AD) en el periodo reproductivo temprano permitió alcanzar valores de IAF por encima del crítico a inicios del PC. El riego en el periodo vegetativo permitió alcanzar el IAF crítico a inicios del periodo reproductivo, manteniéndose o no dependiendo del AD en la siguiente etapa.

#### 4.1.2.5. Relación entre el área foliar e intercepción de radiación

En la figura 13 se presenta la regresión entre el IAF y el porcentaje de RS interceptada. En esta se observa que la correlación entre ambas variables fue positiva y de tipo exponencial, presentando un coeficiente de determinación muy alto ( $R^2=0,96$ ). Esto coincidió con lo reportado por Andrade et al. (2000a) quienes mencionan que la relación entre la proporción de RS incidente interceptada y el IAF es curvilínea. Además, Cárcova et al. (2003) mencionan que esta relación se da a través de una función de tipo exponencial. La alta correlación que presentaron ambas variables coincidió con lo mencionado por Gardner et al. (1985), los cuales afirman que el porcentaje de intercepción de la RS se explicó principalmente por el IAF junto al coeficiente de extinción de la luz.

El IAF crítico se calculó sustituyendo el 95% de intercepción por “x” en la ecuación de la figura 13, el cual en este caso fue de 6,45. Este valor fue mayor al reportado por Toledo (2013), el que obtuvo un IAF crítico entre 3,1 y 4,5 dependiendo de la estructura de la planta, la densidad de siembra y el espaciamiento entre surcos.

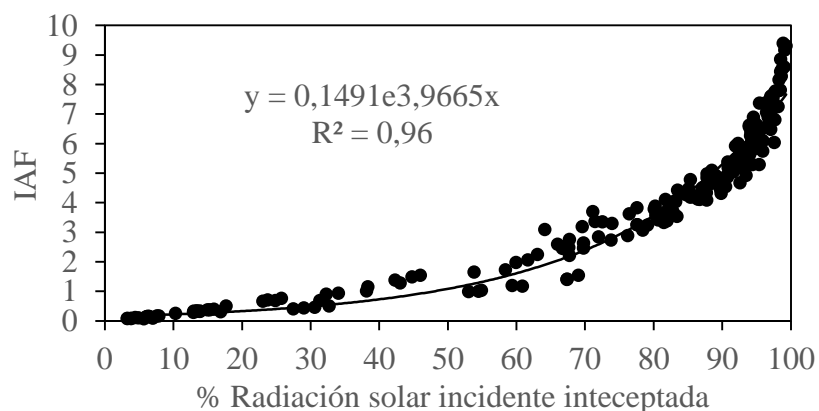
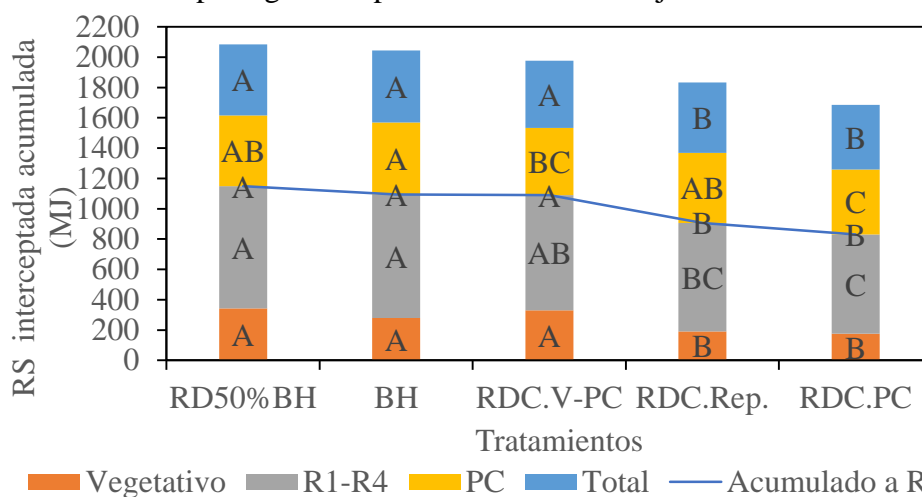


Figura 13. Regresión entre el índice de área foliar (IAF) y el porcentaje de radiación solar interceptada, para todos los tratamientos

#### 4.1.2.6. Radiación solar interceptada en distintas etapas fenológicas

En la figura 14 se presenta la RS incidente interceptada en los distintos momentos del ciclo. Los tratamientos pudieron separarse en dos grupos, uno compuesto por los que recibieron riego en la etapa vegetativa (BH, RD50%BH y RDC.V-PC), los que lograron un IAF capaz de interceptar más RS incidente de forma más temprana (figura 11), ya que no presentaron diferencias en cuanto a la RS interceptada en la etapa vegetativa y en el total del ciclo (figura 14), y otro grupo formado por los que sufrieron deficiencias hídricas en la etapa vegetativa (RDC.PC y RDC.Rep.), los que a causa de estas vieron retrasado el crecimiento del IAF (figura 11) y no pudieron interceptar la misma RS que el primer grupo en la etapa vegetativa, ni durante todo el ciclo. Esto según Cárcova et al. (2003) se debe a que es importante generar en forma temprana un IAF que intercepte la mayor proporción de la RS incidente y, además este IAF se debe mantener durante el mayor tiempo posible.

Las estrategias de riego que se encontraron en confort hídrico en la etapa vegetativa (BH, RD50%BH y RDC.V-PC) interceptaron mayor cantidad de RS en el periodo R1-R4 (figura 14), por lo que las deficiencias hídricas en el periodo R1-R4, sean severas (RDC.V-PC) o moderadas (RD50%BH) no se tradujeron en disminuciones de la interceptación de la RS en este periodo si en el periodo anterior se generó un IAF cercano al crítico. El RDC.Rep. interceptó significativamente menos RS que el RD50%BH en el periodo R1-R4 (figura 14), debido principalmente a que en el RDC.Rep. las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa provocaron un IAF bajo al finalizar esta etapa.



La línea azul corresponde a la RS acumulada hasta R4; barras con diferente letra dentro del mismo periodo difieren significativamente entre sí ( $p < 0,05$ , Tukey); BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico

Figura 14. Radiación solar (RS) interceptada acumulada (MJ) en el periodo vegetativo, en R1-R4, en el periodo crítico (PC) y en el total del ciclo

La RS interceptada acumulada a R4 en cada tratamiento (figura 14) se encontró asociado a la acumulación de MS a R4, excepto para el RDC.V-PC (figura 8). Esto se explicó cómo mencionan Andrade y Sadras (2000b) producto de que la menor producción de MS en cultivos bajo estrés hídrico puede deberse a una reducción en la interceptación de la RS y/o a una disminución en la eficiencia de conversión de RS interceptada en biomasa.

Las estrategias de riego que no presentaron deficiencias hídricas severas en el periodo R1-R4 (BH, RD50%BH, RDC.Rep.) fueron capaces de interceptar mayor cantidad de RS durante el PC (figura 14), ya que durante esta etapa sostuvieron un IAF cercano al crítico (figura 11). Esto provocó que estas estrategias de riego tendieron a obtener las mayores TCC en el PC (figura 10). Mondino y Gómez (2006) afirman que la máxima TCC se da en coincidencia con la mayor interceptación de RS. El RDC.PC y el RDC.V-PC no se diferenciaron significativamente en cuanto a la RS interceptada en el PC logrando el 90 y 93,5% con respecto al BH, respectivamente (figura 14). Esta fue la causa de porque estos tendieron a una menor TCC en el PC con respecto al BH (figura 10), ya que según Vaiman et al. (2010) un balance hídrico negativo durante gran parte del ciclo produce un IAF bajo en el PC, que afecta la interceptación de la RS y la TCC en esta etapa.

En la figura 15 se presenta la relación entre el IAF a R4 y la RS interceptada en el PC, en la cual se observa la alta correlación positiva entre ambas variables ( $R^2=0,90$ ), la cual presentó un comportamiento exponencial al igual que la correlación entre el IAF y el porcentaje de interceptación de la RS (figura 13). Por lo tanto, el IAF a inicios del PC (figura 12) fue el principal determinante de la cantidad de RS interceptada durante el PC (figura 14) en condiciones donde no existieron deficiencias hídricas durante este periodo.

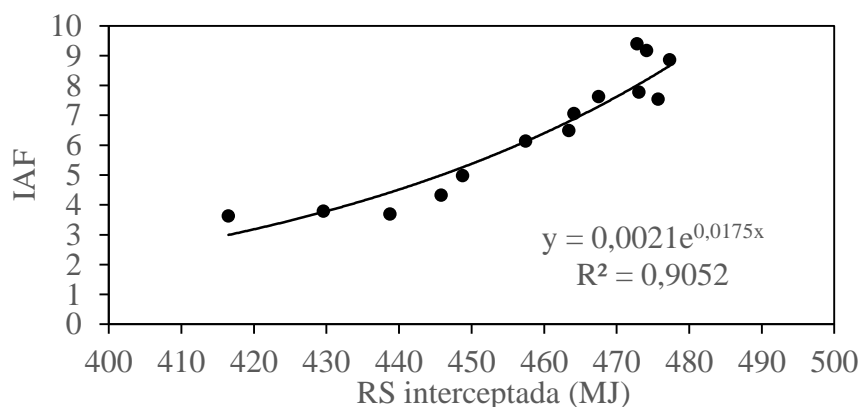


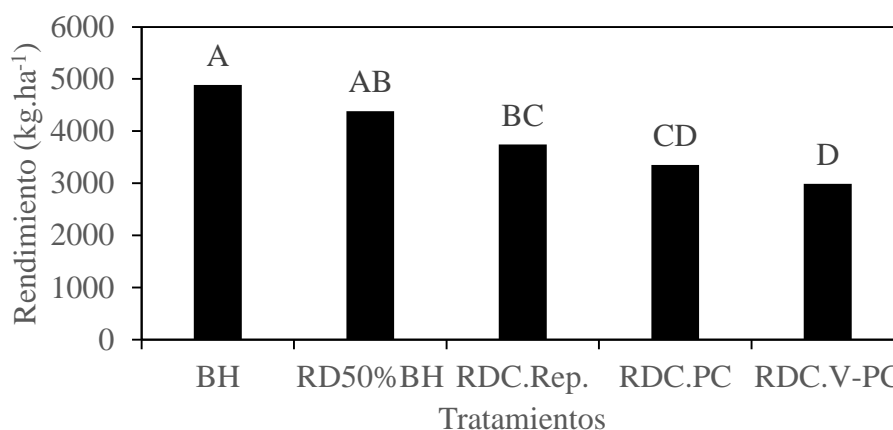
Figura 15. Relación entre el índice de área foliar (IAF) en R4 y la radiación solar (RS) interceptada en R4-R6 (MJ)

La información presentada permite concluir que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa fueron responsables de la menor interceptación de la RS en el periodo R1-R4. Por otro lado, las deficiencias hídricas severas en la etapa R1-R4 fueron la causa de la menor interceptación de la RS durante el PC, dada la influencia del estrés sobre el IAF a R4, siendo este último el principal determinante de la RS interceptada en el PC en

ausencia de deficiencias hídricas en esta etapa. Los tratamientos que maximizaron la intercepción de la RS en el PC tendieron a presentar una mayor TCC en el PC.

#### 4.1.3. Efecto del riego deficitario sobre el rendimiento

En la figura 16 se muestra el rendimiento logrado por cada tratamiento. El rendimiento de soja fue afectado por la disponibilidad hídrica determinada por las distintas estrategias de riego ( $p$ -valor=0,0001). El BH obtuvo el mayor rendimiento con 4.883  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . El RD50%BH no presentó diferencias significativas con el BH por estar sometido a deficiencias hídricas moderadas solamente durante el periodo R2-R4.5, logrando el 90% del rendimiento con BH (figura 16). Andriani (2002) obtuvo reducciones en el rendimiento del 10% con deficiencias hídricas moderadas en el periodo R1-R5. Prieto Angueira et al. (2016) obtuvieron que el rendimiento no disminuyó significativamente en los RD que se regó con el 50 y 75% del volumen en BH. Doss et al. (1974) en forma contraria mencionan que el rendimiento de soja aumenta con el riego.



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Columnas con diferente letra difieren entre sí ( $p<0.05$ ; Tukey).

Figura 16. Rendimiento en grano ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )

El RDC.Rep. presentó un rendimiento significativamente menor al BH, en un 23% (figura 16). Esta disminución coincidió con los resultados obtenidos por Andriani (2002) el que encontró que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa y las deficiencias moderadas en el periodo R1-R5 disminuyeron el rendimiento un 10% en cada etapa, respectivamente. Por tanto, los RD con deficiencias hídricas moderadas en R1-R4 (RDC.Rep. y RD50%BH) lograron los mayores rendimientos entre las estrategias de RD, debido a una mayor intercepción de la RS (figura 14) y a una mayor TCC en el PC (figura 10). Klocke et al. (1989), Caraballo de Silva (1990), Andriani et al. (1991) con respecto a esto mencionan que la respuesta a las deficiencias hídricas depende de la duración, del estadio y de la intensidad en que se producen. Por otro lado, Sweeney y Granade (2002) reportaron aumentos del rendimiento con riego en R1-R4.

No se registraron diferencias significativas en el rendimiento del RDC.Rep. y el RD50%BH, por lo que en el primero las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa no afectaron el rendimiento por si solas con respecto al BH (figura 16). Esto según Giménez (2014b) se debe a que las deficiencias hídricas en la etapa vegetativa tienen posibilidades de ser compensadas en el periodo R1-R3. En el RDC.Rep. se observó este comportamiento, aunque las deficiencias hídricas moderadas en el periodo R1-R4 no permitieron una compensación total, ya que el RDC.Rep. rindió menos que el BH (figura 16). Este menor rendimiento pudo deberse a que el RDC.Rep. interceptó menos RS en la etapa R1-R4, ya que no se diferenció con el BH en la RS interceptada (figura 14), ni en la TCC en el PC (figura 10). Por tanto, en el BH el riego en la etapa vegetativa aumentó el rendimiento con respecto al RDC.Rep. debido a que en este último existieron deficiencias hídricas moderadas en el periodo R1-R4 y en el PC no ocurrieron deficiencias hídricas.

El RDC.PC y el RDC.V-PC presentaron rendimientos significativamente menores al BH, en un 33 y 39%, respectivamente (figura 16). Estos compartieron las deficiencias hídricas severas durante el periodo R1-R4, por lo que interceptaron la menor cantidad de RS (figura 14) y lograron las menores TCC en el PC (figura 10). Andriani (2002) obtuvo que las disminuciones en rendimiento por deficiencias hídricas severas en el periodo R1-R5 son mayores al 20%. Giménez et al. (2014c) indican que cuando las deficiencias hídricas se acumularon en la etapa vegetativa y la floración, las pérdidas de rendimiento fueron entre un 15 y 23 % del rendimiento con BH. Estas disminuciones en rendimiento son menores que las obtenidas en el RDC.PC del presente ensayo, debido a que en este último las deficiencias hídricas fueron más intensas.

Por otro lado, el RDC.PC y el RDC.V-PC presentaron distintas disponibilidades hídricas en el periodo vegetativo, lo cual no se tradujo en diferentes rendimientos (figura 16). Esto se explicó debido a que el alto IAF logrado en la etapa vegetativa (figura 11) y la mayor intercepción de la RS registrada en R1-R4 por el RDC.V-PC con respecto al RDC.PC (figura 14) no se concretó en rendimiento durante el PC, ya que ambos tratamientos llegaron a R4 con un IAF inferior al crítico (figura 12) y tuvieron bajas TCC durante el PC (figura 10). Giménez et al. (2014c), Candoğan y Yazgan (2016) mencionan que el RD en la etapa vegetativa no afectó el rendimiento y que este se redujo cuando se aplicó RD durante la floración y formación de vainas.

En la figura 17 se presenta la relación entre el rendimiento y el IAF a R4, ya que este se determinó como el parámetro de crecimiento del cultivo que presentó mayor correlación con el rendimiento. La correlación entre estas dos variables es lineal, alta y positiva ( $R^2=0,7474$ ). Esto se explicó debido a que el IAF que alcanzó cada tratamiento a inicios del PC determinó la capacidad de interceptar RS durante el PC en condiciones en que no ocurren deficiencias hídricas durante esta etapa (figura 15), la cual presentó una alta correlación con el rendimiento ( $R^2=0,64$ ). Martignone et al. (2010) determinaron que existe una alta asociación entre el IAF y el número de granos.

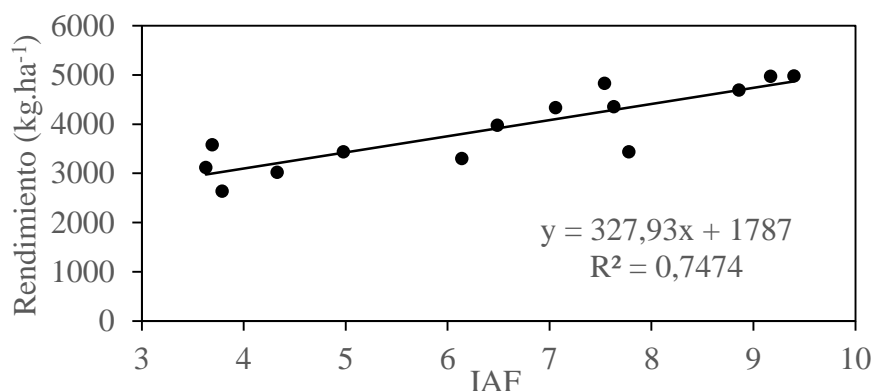


Figura 17. Relación entre en rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y el índice de área foliar (IAF) en R4

La información generada permite concluir que es posible ahorrar hasta un 50% de riego sin repercutir significativamente en el rendimiento, en condiciones en que no existen limitantes hídricas durante la etapa vegetativa, ni en el PC. Además, fue posible determinar que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa y en el periodo R1-R4 disminuyeron el rendimiento, presentando un mayor impacto las deficiencias en el periodo R1-R4. No obstante, las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa disminuyeron un 23% el rendimiento con respecto al BH, cuando se suman a las deficiencias moderadas en R1-R4. El riego en la etapa vegetativa no aumentó el rendimiento cuando en el periodo R1-R4 ocurrieron deficiencias hídricas severas.

#### 4.1.4. Relación entre el rendimiento y sus componentes

En la figura 18 se muestra la relación entre el rendimiento y el número de granos. $\text{m}^{-2}$ . Como era de esperar esta correlación fue lineal y positiva, indicando que un mayor número de granos se traduce en mayores rendimientos. De todas formas, esta correlación fue moderada ( $R^2 = 0.52$ ), siendo más baja que la reportada por Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013), quienes obtuvieron un  $R^2 = 0,98$ .

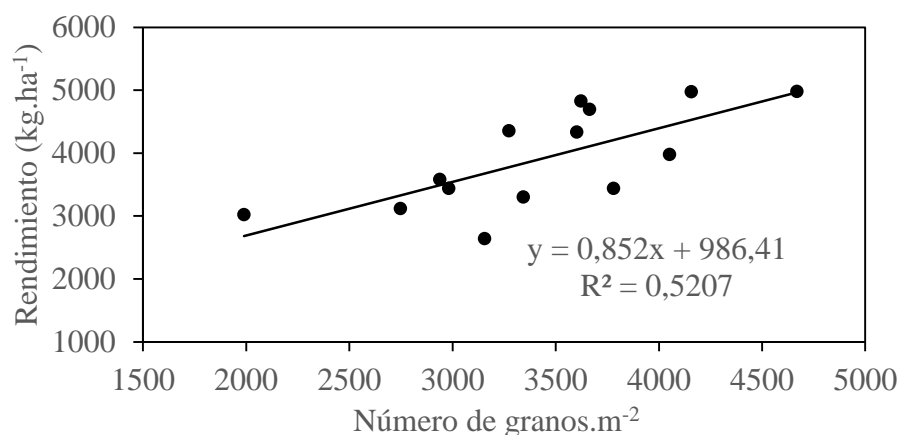


Figura 18. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y el número de granos. $\text{m}^{-2}$

En la figura 19 se muestra la relación entre el rendimiento y el peso de mil granos. La correlación entre ambas variables fue baja, lineal y negativa, coincidiendo el coeficiente de determinación con el reportado por Canosa y Prieto (2013), quienes obtuvieron un  $R^2 = -0,24$ . Esto según Karam et al. (2005), Giménez (2014a) se explicó porque este componente del rendimiento es residual, es decir se determina después que se fijó el número de granos y por tanto según Giménez (2014a) cuando el número de granos fijados es elevado, los fotoasimilados para la etapa de llenado de granos pueden no ser suficientes para obtener un peso de granos alto. Además, el peso de mil granos fue bajo en general para todos los tratamientos, encontrándose en un rango de 110 a 120 g.

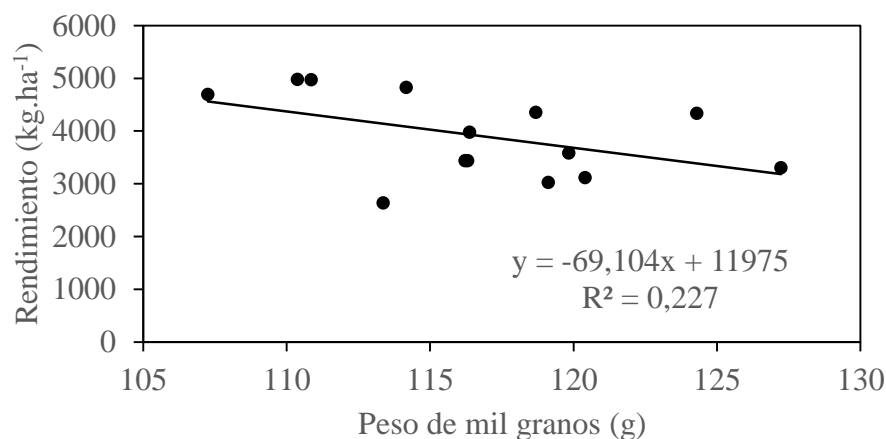


Figura 19. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y el peso de mil granos (g)

La información presentada evidenció una mayor correlación entre el número de granos. $\text{m}^{-2}$  y el rendimiento, demostrando que este componente es el principal determinante del rendimiento. Kantolic et al. (2003a) afirman que los cambios en el número de granos por variaciones ambientales están estrechamente asociados con cambios en el rendimiento, siendo menor la relación entre el peso de los granos y el rendimiento.

#### 4.1.5. Componentes del rendimiento

En el cuadro 5 se puede apreciar que no se registraron diferencias significativas para el peso de mil granos. El número de granos. $\text{m}^{-2}$  tendió a diferenciarse entre las distintas estrategias de riego ( $p < 10$ ). El RDC.PC y el RDC.V-PC no se diferenciaron en el número de granos. $\text{m}^{-2}$  y tendieron a lograr menores valores con respecto al BH (cuadro 5), lo cual se debió a que tendieron a obtener menores TCC en el PC (figura 10). En el RDC.V-PC el riego en la etapa vegetativa no se tradujo en un mayor número de granos. $\text{m}^{-2}$  con respecto al RDC.PC, lo cual explicó los similares rendimientos para estas estrategias de RDC (figura 16). Giménez et al. (2014c) obtuvieron un elevado número de granos. $\text{m}^{-2}$  con deficiencias acumuladas en la etapa vegetativa y en la floración, aunque este tendió a ser menor que con BH en todo el ciclo, debido a las deficiencias durante la floración, lo que según Kantolic et al. (2003a) se debe a una menor fuente de asimilados en la floración.



El RD50%BH y el RDC.Rep. no se diferenciaron significativamente en el número de granos.m<sup>-2</sup> con respecto al BH (cuadro 5), por lo que los RD que presentaron deficiencias hídricas menos intensas en el periodo R1-R4 y mayor TCC durante el PC (figura 10) tendieron a lograr un alto número de granos.m<sup>-2</sup>, lo cual coincidió con los rendimientos alcanzados por estos tratamientos (figura 16). Esto según Andrade y Sadras (2000b) se debe a que existe una buena correlación entre la TCC en el PC y el número de granos, por lo que las deficiencias hídricas durante los ENC afectan el rendimiento si disminuyen la TCC en el PC, ya que según Andrade et al. (2000a) la soja sigue floreciendo una vez aliviado el estrés hasta R5, con un menor aborto de flores y vainas. Giménez et al. (2014c) mencionan que la soja produce un número de flores superior al que concreta, permitiendo que exista cierta compensación en el número de granos ante situaciones de estrés en la etapa R1-R4.

Cuadro 5. Componentes y sub-componentes numéricos del rendimiento de soja

Tratamiento	Número de vainas.pl <sup>-1</sup>	Número de granos.pl <sup>-1</sup>	Número de granos.m <sup>-2</sup>	Peso mil granos (g)
BH	54 A	138 A	4163 A	110 A
RD50%BH	36 B	96 B	3759 AB	118 A
RDC.Rep.	43 AB	108 AB	3345 AB	117 A
RDC.PC	36 B	87 B	2843 B	120 A
RDC.V-PC	35 B	88 B	2830 B	120 A
CV (%)	11	12	15	4
DMS	14	39	1307	14

BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico; CV (%)=coeficiente de variación en porcentaje; DMS=diferencia mínima significativa; pl=planta; valores con diferente letra dentro de la columna difieren entre sí ( $p < 0.05$  para todas las variables a excepción del número de granos.m<sup>-2</sup>;  $p < 0.10$  para número de granos.m<sup>-2</sup>, Tukey)

El RDC.Rep. no presentó menor TCC en el PC con respecto al BH (figura 10), no obstante, obtuvo numéricamente un menor número de granos.m<sup>-2</sup> que este (cuadro 5), lo cual se explicó por un menor crecimiento en R1-R4, debido a la menor intercepción de RS en este periodo (figura 14), producto de las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativo y moderadas en R1-R4. Frederick et al. (2001), Kantolic (2003b) afirman que las reducciones en la fuente que disminuyen la TCC en R1-R5 provocan un menor crecimiento de las ramificaciones y un menor número de granos en estas.

En este ensayo, no se detectaron diferencias significativas en el peso de los granos, pero el BH durante todo el ciclo obtuvo numéricamente menos peso de mil granos que las estrategias de RD, lo que se explicó debido a que con BH se obtuvo un número de vainas por planta significativamente mayor a las estrategias de RD, a excepción del

RDC.Rep. (cuadro 5). Andriani et al. (1991), Andriani (2002) afirman que al reestablecerse el AD en R4-R6 luego de que ocurran deficiencias hídricas en R1-R4 se da una menor competencia de asimilados entre las vainas, ya que según Kantolic y Slafer (2003c) cada vaina que se produce requiere asimilados para sobrevivir y compite por ellos.

El análisis anterior permite concluir que los efectos de las deficiencias hídricas severas en la etapa reproductiva temprana observados sobre el IAF, la intercepción de la RS y la TCC durante el PC, tendieron a disminuir el número de granos.m<sup>-2</sup>. Esto es debido a que el número de granos se define principalmente durante el PC. Las disminuciones en el número de granos debidas a las deficiencias hídricas en ENC no lograron ser compensadas totalmente por el peso de los granos.

#### 4.1.6. Efecto de la radiación sobre los componentes de rendimiento

En la figura 20 se muestra la relación entre el número de granos.m<sup>-2</sup> y la RS interceptada en el PC, la cual fue lineal y positiva, con un R<sup>2</sup>=0,47, por lo que a mayor RS interceptada en el PC mayor número de granos y mayor rendimiento (figura 18). Esto explicó la alta correlación entre el IAF a R4 y el rendimiento (figura 17). Asimismo, esto coincidió con que el BH, el RD50%BH y el RDC.Rep. interceptaron las mayores cantidades de RS en el PC (figura 24) y lograron los mayores números de granos.m<sup>-2</sup> (cuadro 5). Kantolic (2003b) de forma similar afirma que existe una buena relación entre el número de granos y la RS interceptada entre R3 y R6 (R<sup>2</sup>=0,82).

En el cuadro 6 se puede observar que este ensayo presentó un elevado número de granos.m<sup>-2</sup> en forma relativa, siendo el segundo más alto en la serie de ensayos analizada, coincidiendo con los niveles de RS incidente media diaria en el PC. Esto se explicó por la correlación entre la RS interceptada en el PC y el número de granos.m<sup>-2</sup> (figura 20).

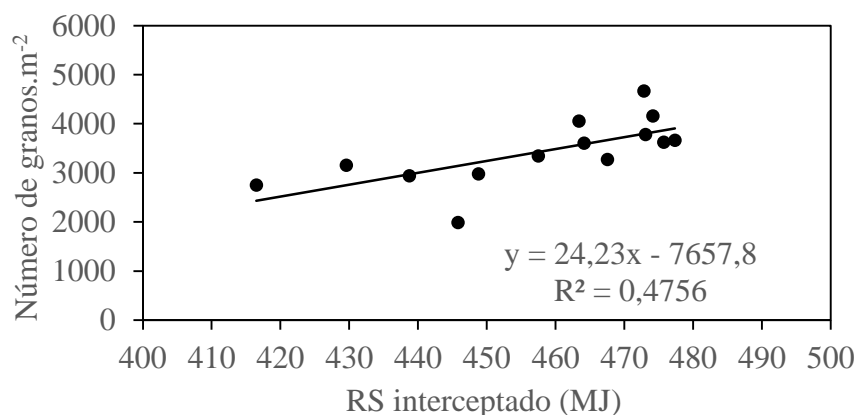


Figura 20. Relación entre el número de granos.m<sup>-2</sup> y la radiación solar (RS) incidente interceptada en el periodo R4-R6 (MJ)

Kantolic (2008) menciona que el número de granos guarda una relación positiva con la duración del periodo crítico (PC) al permitir que un mayor crecimiento se acumule durante el llenado de granos. Este comportamiento no se apreció en la serie de ensayos evaluados (cuadro 6). Por lo tanto, el número de granos para esta serie de ensayos estuvo principalmente determinado por la RS incidente media diaria en el PC y no por la RS incidente acumulada en esta etapa. Esto es contrastante a lo que reporta Kantolic (2003b) de una relación robusta entre el número de granos y la RS interceptada acumulada entre R3 y R6. Cabe aclarar que la duración del PC no se puede tomar en cuenta para los datos del presente ensayo presentados en la figura 20, ya que la longitud del PC no fue afectada por las distintas estrategias de riego.

Cuadro 6. Radiación solar (RS) incidente media diaria en el periodo crítico (PC) en  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ , rendimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) y componentes principales de rendimiento para distintos ensayos realizados a nivel nacional, en tratamientos con bienestar hídrico en todo el ciclo

Ensayos	RS media diaria en el PC ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ )	Días de PC	Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Número de granos. $\text{m}^{-2}$	Peso mil granos (g)
Grasso y Montero (2011)	18	31	4885	2473	197
Canosa y Prieto (2013)	20	36	6192	3348	186
Giménez (2014a)	23,2	36	7275	4400	168
Foster y Rovegno (2015)	16,3	31	4611	2720	170
Ensayo 2015-2016	22,2	21	4883	4163	110

El peso de mil granos del presente ensayo fue sustancialmente menor al del resto de los ensayos en condiciones de BH en todo el ciclo (cuadro 6). Esto se explicó debido a que en el presente ensayo se observó que el número de días del PC fue muy inferior al del resto de los ensayos (cuadro 6), por lo que el largo del periodo efectivo de llenado de granos pudo limitar el peso de estos, debido a que la mayor acumulación de peso de los granos se da en el periodo R5-R6, ya que según Sadras et al. (2000) en el estadio R5 inicia el llenado efectivo de los granos, y en R6 resta un 20% de crecimiento de los granos.

En el presente ensayo con BH se obtuvo una tasa de crecimiento de granos en el PC de  $5,2 \text{ g.día}^{-1}$ , la que coincidió con las tasas reportadas por Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013), Giménez (2014a), Foster y Rovegno (2015) quienes obtuvieron valores entre 5 y  $6 \text{ g.día}^{-1}$ . La duración del PC del presente ensayo disminuyó 12 días con respecto al promedio de los ensayos anteriores. Por tanto, el presente ensayo con igual duración del PC que el promedio de los ensayos anteriores, hubiese alcanzado un peso de mil granos de aproximadamente 170 g. Giménez (2014a) obtuvo sin limitantes hídricas el

rendimiento más alto de la serie de ensayos presentados en el cuadro 6, con un número de granos similar al presente ensayo, ya que ambos presentaron valores de RS media diaria en el PC elevadas, además el peso de mil granos reportado por este autor fue de 168 g, el cual se obtuvo con 15 días más de PC con respecto al presente ensayo.

La temperatura media diaria durante el PC del presente ensayo fue de 26°C, siendo la más alta en relación a las registradas en los ensayos de Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013), Giménez (2014a), Foster y Rovegno (2015) con temperaturas de 23, 25, 23, 23°C respectivamente, por lo cual la menor duración del PC del presente ensayo se explicó en parte debido a la mayor temperatura, la que aumentó la tasa de desarrollo. Además, la respuesta a los factores ambientales por parte de los distintos cultivares podría ser distinta, ya que en todos los experimentos anteriores se utilizó el cultivar DM 5.1i a diferencia del presente ensayo en el que se utilizó el cultivar DM 4915 IPRO STS. Giménez (2007) con respecto a esto afirma que en los GMs III y IV la temperatura es el factor determinante y en los GMs V a VIII operan el fotoperíodo y la temperatura. Este autor utilizando materiales pertenecientes al GM IV obtuvo para uno de los años evaluados una duración del PC similar a la del presente ensayo.

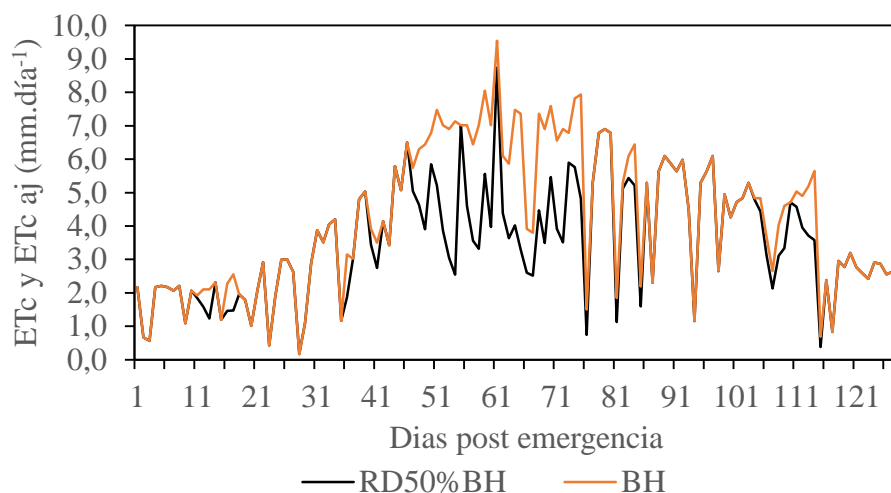
La principal limitante para alcanzar el rendimiento potencial reportado en la misma localidad se debió fundamentalmente a que las altas temperaturas afectaron la duración del llenado de granos, lo cual afectó el peso de estos y no el número, ya que la RS en el PC fue suficiente para alcanzar un número de granos.m<sup>-2</sup> muy elevado. Por lo tanto, el peso individual de los granos a pesar de no ser el componente de rendimiento más asociado al rendimiento al variar la estrategia de riego, fue el más limitante para alcanzar el rendimiento potencial.

#### 4.1.7. Evapotranspiración del cultivo con bienestar hídrico y evapotranspiración del cultivo ajustada con riego deficitario

En la figura 21 se observa la E<sub>Tc</sub> y la E<sub>Tc</sub> aj diarias registradas para el BH y el RD50%BH, respectivamente. El RD50%BH evapotranspiró menos agua en el periodo R2-R4.5 con respecto al BH, lo que se debió a que el AD estuvo por debajo del umbral crítico durante este periodo (figura 7). Allen et al. (2006), Otegui (2009) afirman que la absorción de agua que puede realizar un cultivo bajo condiciones limitantes de agua depende del AD entre otros factores. Rosadi et al. (2005) aseguran que cuando el AD es igual o mayor al q<sub>c</sub>, la E<sub>Tr</sub> es igual a la E<sub>Tc</sub>, pero si este es menor, el coeficiente E<sub>Tr</sub>/E<sub>Tc</sub><1 y las plantas son estresadas.

El valor máximo de E<sub>Tc</sub> diaria fue a los 61 días post emergencia en el estadio R3 con 9,5 y 8,7 mm.día<sup>-1</sup> para el BH y el RD50%BH, respectivamente (figura 21). Wani et al. (2012) obtuvieron que los valores de E<sub>Tc</sub> máximos diarios son de aproximadamente 8-9 mm/día, los cuales ocurren cuando se alcanza el IAF máximo (cerca de la plena floración hasta el inicio del llenado de las vainas). Farias et al. (2007) mencionan que la

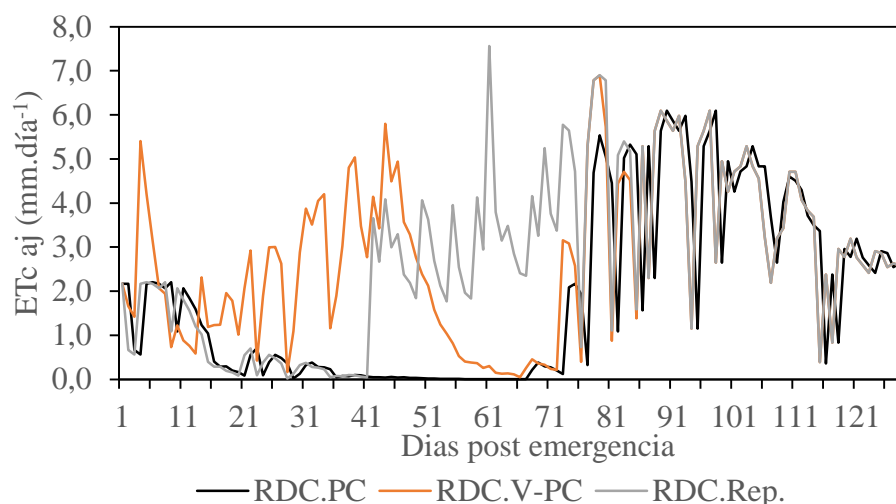
ETc diaria aumenta con el desarrollo de la planta, alcanzando el máximo durante floración-llenado de granos (7-8 mm.día<sup>-1</sup>), asimismo Della Maggiora et al. (2000), Andriani (2002), Prieto Angueira et al. (2016) reportaron valores similares de ETc diaria.



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario controlado con el 50% de riego del BH todo el ciclo. Figura 21. Evolución de la evapotranspiración de cultivo (ETc) en mm.día<sup>-1</sup> para el BH y de la evapotranspiración de cultivo ajustada (ETc aj) en mm.día<sup>-1</sup> para el RD50%BH

En la figura 22 se presenta la ETc aj diaria para el RDC.PC, el RDC.V-PC y el RDC.Rep. En estos tratamientos la ETc diaria también se correlacionó con el AD (figuras 4, 5 y 6, respectivamente). El RDC.Rep. presentó una ETc aj diaria máxima de 7,6 mm.día<sup>-1</sup> a los 61 días post emergencia (R3). El RDC.V-PC tuvo una ETc aj diaria máxima de 6,9 mm.día<sup>-1</sup> a los 79 días post emergencia (R4.5), seguido del RDC.PC con una ETc aj diaria máxima de 6,1 mm.día<sup>-1</sup> a los 89 días post emergencia (R6). El retraso en la máxima ETc aj diaria en el RDC.PC y el RDC.V-PC respecto al RDC.Rep. fue debido a que las deficiencias hídricas severas en R1-R4 impidieron el consumo de agua por el cultivo hasta que se restableció el AD en el PC. En el PC la demanda atmosférica fue menor a la registrada en el periodo R1-R4, condicionando la magnitud de la máxima ETc aj diaria.

En la figura 23 se observa como varió el agua evapotranspirada total en el ciclo y los porcentajes en cada etapa fenológica. El BH evapotranspiró un total de 534 mm durante todo el ciclo, seguido del RD50%BH, con un 83% del BH, o sea 445 mm. Rodríguez et al. (s.f.) reportaron valores de ETc de 533 mm para soja en promedio. Giménez y García Petillo (2011) con valores simulados de ETc en soja de GM IV obtuvieron 567 mm para Colonia y 509 mm para Salto.



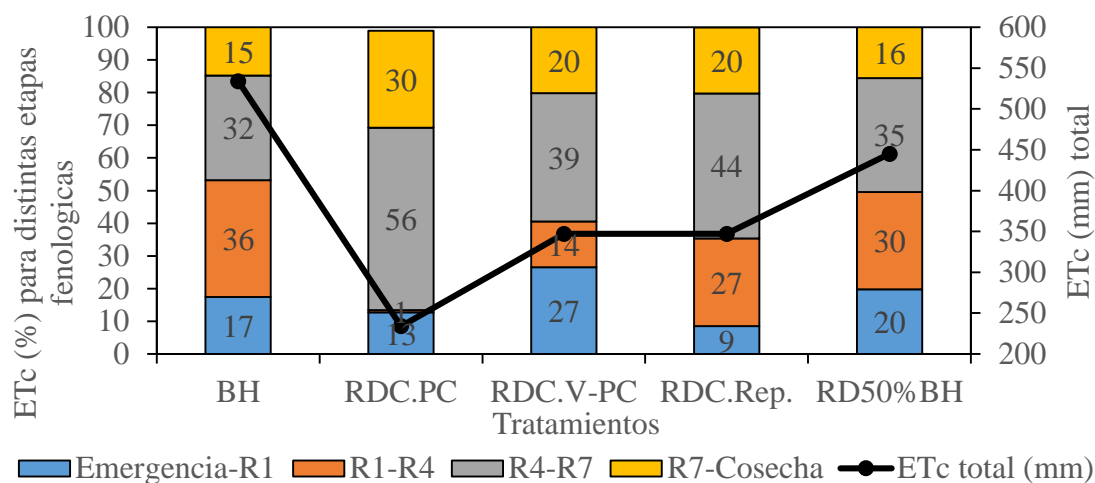
RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico

Figura 22. Evolución de la evapotranspiración de cultivo ajustada diaria (ETc aj) en mm.día<sup>-1</sup> para los tratamientos RDC.PC, RDC.V-PC y RDC.Rep.

El RDC.V-PC y el RDC.Rep. consumieron el 65% del agua con respecto al BH. Estos consumieron 53 y 71% del agua durante el periodo R1-R7, respectivamente (figura 23), lo cual coincidió con el mayor rendimiento alcanzado por el RDC.Rep. con respecto al RDC.V-PC (figura 16). Esto evidenció la importancia de la evapotranspiración en la etapa reproductiva en el crecimiento y el rendimiento del cultivo, ya que según Otegui (2009) la transpiración es el término del balance de agua que está directamente ligado con la fotosíntesis, y por consiguiente con el crecimiento y Dardanelli et al. (2003) afirman que el rendimiento está estrechamente asociado con la transpiración y fijación del CO<sub>2</sub>.

El BH registró la mayor proporción de la ETc total en el periodo R1-R7 con un 68%, siendo las ETc del periodo R1-R4 y del PC del 36 y el 32% del total del ciclo, respectivamente (figura 23). El RD50%BH presentó un patrón de distribución de la ETc similar al BH. Giménez (2012) obtuvo que entre 66 y 69% de la ETc se da en R1-R6, siendo R1-R3 la etapa con mayor ETc en GM IV sembrados en noviembre en Uruguay, debido a que, en esas condiciones, esta etapa ocurre principalmente en enero que es el mes de máximas demandas, seguido del PC con el 30 al 38 % de la ETc total (Giménez, 2014a).

El RDC.PC presentó la menor ETc aj, siendo del 44 % con respecto al BH (figura 23). Este llegó a los estadios reproductivos tempranos con un porcentaje de AD muy bajo, por lo que se registró un nivel muy bajo de ETc aj acumulada en R1-R4. El RDC.PC evapotranspiró el 56% del agua en el PC una vez que se restituyó el AD por efecto del riego, alcanzando en esta etapa una ETc similar a la del RDC.V-PC, con 131 y 136 mm, respectivamente, siendo los valores más bajos con respecto a los demás tratamientos. Esto coincidió con los bajos rendimientos del RDC.PC y del RDC.V-PC (Figura 16).



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico

Figura 23. Distribución en porcentaje de la evapotranspiración de cultivo (ETc) por tratamiento para las distintas etapas fenológicas del cultivo y total en mm

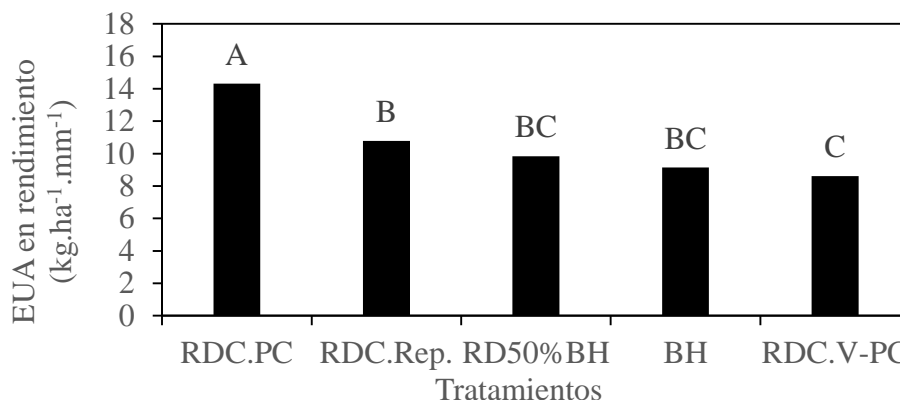
Las estrategias de riego que evapotranspiraron mayores volúmenes de agua en todo el ciclo fueron las que lograron los mayores rendimientos (BH y RD50%BH), lo cual según García (s.f.), Giménez (2014a) se debe a que las deficiencias hídricas disminuyen el consumo de agua, y esto afecta el rendimiento. No obstante, se evidenció que el volumen evapotranspirado en cada etapa fenológica generó un impacto diferencial sobre el rendimiento, siendo los estadios reproductivos los más susceptibles a disminuciones en la ETc producto de deficiencias hídricas severas (RDC.PC y RDC.V-PC).

#### 4.1.8. Eficiencia de uso del agua

El BH presentó una EUA de  $9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  (figura 24). Della Maggiora et al. (2000), Vilche y Costanzo (2011) coincidiendo con esto obtuvieron EUA sin limitantes hídricas de  $9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , mientras Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013), Giménez (2014a), Foster y Rovegno (2015) en Paysandú con el cultivar DM 5.1i y con BH en todo el ciclo obtuvieron EUA superiores a la del presente ensayo en 23%, 24%, 32% y 11%, respectivamente. Además, en el presente ensayo, con BH se alcanzó un rendimiento relativamente bajo en comparación a los ensayos anteriores como se observa en el cuadro 6.

En la figura 24 se puede apreciar el RDC.PC que fue sometido deficiencias hídricas severas en las ENC alcanzó significativamente una mayor EUA en relación a las restantes estrategias de riego con  $14 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Esto demostró la alta eficiencia con la que fue utilizada el agua en el PC para concretar rendimiento, ya que como se observó anteriormente, en el PC se define el principal componente del rendimiento. Kirda (2002),

Fereres y Soriano (2007) afirman que el aumento en EUA bajo RD con respecto al riego completo se debió a que la disminución del rendimiento, en términos relativos, fue menor que la disminución de la ETc. Sincik et al. (2008) obtuvieron que cuando aumentó la cantidad de riego el rendimiento aumentó mientras que la EUA disminuyó.



BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Columnas con diferente letra difieren entre sí ( $p < 0.05$ ; Tukey)

Figura 24. Eficiencia de uso del agua (EUA) para rendimiento en grano ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ )

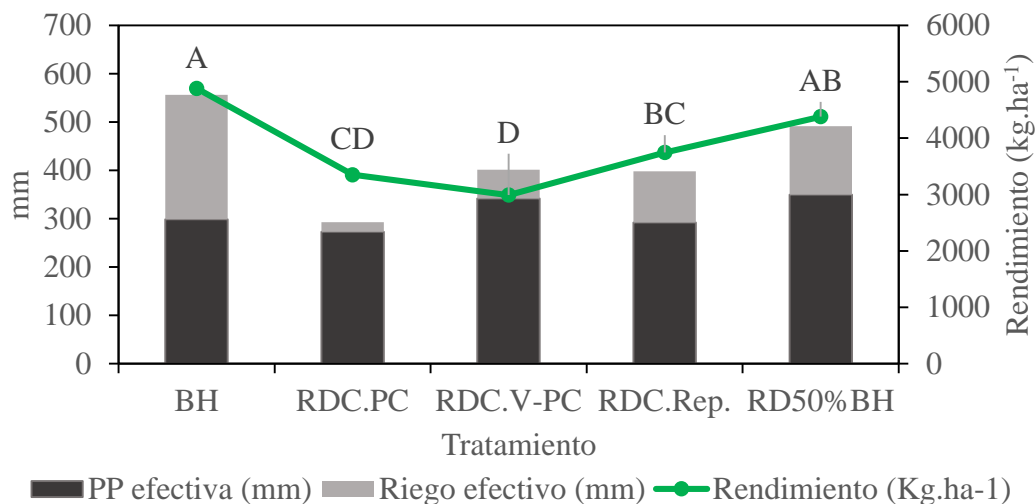
El RDC.Rep. tendió a aumentar la EUA con respecto al BH, RD50%BH y RDC.V-PC (figura 24), lo cual fue explicado debido a que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa disminuyeron el rendimiento menos que en los estadios posteriores (figura 16) y a que según Neyshabouri y Hatfield (1986), Allen et al. (2006) durante los estadios vegetativos la evaporación desde el suelo es la principal causa de pérdida de agua, por lo que según Micucci (2004) derivar la mayor cantidad de agua hacia la transpiración del cultivo aumentó la EUA, ya que es la única pérdida de agua productiva y todas las otras vías de disminución del AD disminuyen la EUA. Esto explicó, además, porque el RDC.PC obtuvo la mayor EUA, aunque presentó deficiencias hídricas severas en R1-R4.

El RD50%BH a pesar de que evapotranspiró menos (figura 23) y no mostró diferencias significativas en rendimiento (figura 16) con respecto al BH, no presentó diferencias en EUA en comparación a este (figura 24), debido a que ambos se encontraron en confort hídrico en la etapa vegetativa. El RDC.V-PC presentó los menores valores de EUA (figura 24) debido al efecto negativo que ejercieron sobre la EUA tanto haber regado el cultivo durante el periodo vegetativo, etapa en la que el agua aplicada no se tradujo en un mayor rendimiento con respecto al RDC.PC, como las deficiencias hídricas severas en el periodo R1-R4, las que afectaron más el rendimiento que en la etapa previa (figura 16).

En la figura 25 se puede apreciar el aporte de las PP efectivas y los riegos a la oferta de agua que recibe el cultivo relacionado con los rendimientos. El rendimiento de los distintos tratamientos fue producto de la cantidad de agua efectiva total con la que el



cultivo contó durante el ciclo (figura 25). Garside et al. (1992) de manera coincidente señalan que la mayor variación en el rendimiento es explicada por el total de agua (lluvia más riego) recibida por el cultivo. El RDC.PC y el RDC.V-PC no se comportaron de la misma manera producto de la mayor y menor EUA, respectivamente (figura 24).



PP = precipitación; BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico. Puntos con diferente letra difieren entre sí ( $p < 0,05$ ; Tukey)

Figura 25. Relación entre rendimiento ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) y la cantidad de agua efectiva (precipitación efectiva más riego efectivo)

Los tratamientos que lograron captar la mayor cantidad de PP fueron el BH y el RD50%BH, ya que no se interceptaron las PP en ninguna etapa del ciclo, aunque el BH recibió el 85% de las PP efectivas del RD50%BH (figura 25). Esto se debió a que, la cantidad efectiva de agua que ingresó al perfil del suelo dependió del AD que éste presentó antes de la lluvia, por lo que con BH al presentar mayores niveles de AD se retuvo menos lluvia antes de que ocurriera escurrimiento. Por tanto, los riegos por debajo del BH permitieron hacer un uso más eficiente de las PP ya que el agua que escurre no es utilizada por el cultivo. Trout et al. (2010) coincidiendo con esto expresan que casi todo el aumento en la EUA aplicada con RD es el resultado de un uso más efectivo de las PP y el aumento del uso del agua almacenada en el suelo. Según Andrade y Caviglia (2015) para aumentar la eficiencia de utilización de los recursos-insumos es necesario aumentar la captura de los recursos-insumos y/o la eficiencia de uso de los recursos-insumos capturados.

La información presentada anteriormente permite concluir que las deficiencias hídricas durante el periodo vegetativo producto de los menores volúmenes de riego, tendieron a aumentar la EUA, posiblemente debido a las menores pérdidas por evaporación directa desde el suelo, y a que en esta etapa el riego afectó menos el rendimiento que en las etapas posteriores. Por otro lado, los menores volúmenes de riego

aplicados en cada evento permitieron una mayor EUA de las PP, lo cual se encontró como uno de los motivos por los cuales con RDC.PC se obtuvo una mayor EUA que con BH.

#### 4.1.9. Principales efectos de las distintas estrategias de riego sobre los parámetros de crecimiento, el rendimiento, los componentes de rendimiento y la eficiencia de uso del agua

En el cuadro 7 se presentan los parámetros de crecimiento (MS, IAF, RS interceptada y TCC en el PC) para las distintas estrategias de riego. Los tratamientos BH, RD50%BH y RDC.Rep. no presentaron diferencias en el IAF a inicios del PC, encontrándose sobre el IAF crítico. Esto provocó que las estrategias de riego que carecieron de deficiencias hídricas severas en R1-R4 acumularan la misma cantidad de RS interceptada durante el PC, lo que explicó las mayores TCC en el PC (cuadro 7). Esto se debió a que el IAF a R4 fue el parámetro que mejor explicó la capacidad del cultivo de interceptar RS durante el PC en ausencia de deficiencias hídricas en esta etapa (figura 15).

El RD50%BH no presentó diferencias en producción de MS en R4, ni en R7 con respecto al BH por haberse encontrado bajo deficiencias hídricas moderadas en R2-R4.5, lo cual se explicó debido a que ambos interceptaron cantidades de RS similares hasta R4 y durante el PC (cuadro 7). El RDC.Rep. acumuló menos MS en R4 que el BH, lo que se explicó debido a la menor RS interceptada por el primero hasta R4 (cuadro 7) producto de las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa. El restablecimiento del AD hasta el 20% en la etapa R1-R4 permitió que el RDC.Rep. alcance el IAF crítico en R4 (cuadro 7). Por tanto, el RDC.Rep. presentó una TCC durante el PC similar al BH, por lo que no se diferenciaron en la producción de MS a madurez (cuadro 7).

Cuadro 7. Parámetros de crecimiento del cultivo según estrategia de riego

tratamiento	MS en R4 (kg.ha <sup>-1</sup> )	MS en R7 (kg.ha <sup>-1</sup> )	IAF en R4	RS int. acumulada a R4 (MJ)	RS int. acumulada en PC (MJ)	TCC en R4-R7 (kg.ha <sup>-1</sup> .día <sup>-1</sup> )
BH	9758 A	13042 A	9,1 A	1095 A	475 A	100 ABC
RD50%BH	8696 AB	13269 A	7 AB	1148 A	468 AB	139 A
RDC.Rep.	7379 B	11558 AB	6,8 AB	907 B	463 AB	127 AB
RDC.PC	3957 C	6077 C	3,7 C	831 B	428 C	64 BC
RDC.V-PC	7538 B	9357 B	4,8 BC	1089 A	444 BC	50 C

BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico; MS=materia seca (kg.ha<sup>-1</sup>); IAF=índice de área foliar; RS int.=radiación solar interceptada; PC=periodo crítico; TCC=tasa de crecimiento del cultivo. Valores con diferente letra dentro de la columna difieren entre sí (p<0.05 para tocas las variables a excepción de la TCC en el PC; p<0.10 para la TCC en el PC, Tukey)

El RDC.V-PC acumuló menos MS en R4 que el BH (cuadro 7), lo cual se explicó debido a que las deficiencias hídricas severas en R1-R4 disminuyeron fuertemente el crecimiento del cultivo en esta etapa. En el RDC.V-PC el IAF disminuyó durante el periodo R1-R4, llegando a R4 con un valor inferior al crítico (figura 11), por lo que la TCC durante el PC fue muy baja y por tanto acumuló menos MS a madurez que el BH (cuadro 7). El RDC.PC fue la estrategia que acumuló menos MS en R4 y en R7, debido a la menor intercepción de RS durante todo el ciclo del cultivo (cuadro 7), producto de las deficiencias hídricas severas acumuladas en las ENC. Por tanto, las deficiencias hídricas severas en R1-R4 afectaron la acumulación de MS a inicios del PC y la TCC en el PC.

En el cuadro 8 se presenta el rendimiento, los componentes numéricos, la ETc total y la EUA según estrategia de riego. El RD50%BH no presentó diferencias con el rendimiento del BH. Esto se explicó porque el RD50%BH presentó deficiencias hídricas moderadas únicamente en el periodo reproductivo temprano, las que no afectaron la TCC en el PC (cuadro 7), y por tanto concretó un alto número de granos.m<sup>-2</sup>(cuadro 8). La disminución en la ETc en el RD50%BH fue del 16% con respecto al BH, la cual no fue suficiente para aumentar significativamente la EUA con respecto al BH (cuadro 8).

Cuadro 8. Rendimiento, componentes de rendimiento, evapotranspiración total y eficiencia de uso del agua según estrategia de riego

Tratamiento	Rendimiento (kg.ha <sup>-1</sup> )	Número de granos.m <sup>-2</sup>	Peso de mil granos (g)	ETc total (mm)	EUA (kg.ha <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup> )
BH	4883 A	4163 A	110 A	534	9,1 BC
RD50%BH	4381 AB	3759 AB	118 A	445	9,8 BC
RDC.Rep.	3745 BC	3345 AB	117 A	347	10,8 B
RDC.PC	3350 CD	2843 B	120 A	234	14,3 A
RDC.V-PC	2989 D	2830 B	120 A	347	8,6 C

BH=bienestar hídrico; RD50%BH=riego deficitario con el 50% de riego del BH en todo el ciclo; RDC.V-PC= riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico; RDC.Rep.=riego deficitario controlado en periodo reproductivo; RDC.PC= riego deficitario controlado en periodo crítico; ETc=evapotranspiración del cultivo; EUA=eficiencia en el uso del agua (kg.ha<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>). Valores con diferente letra dentro de la columna difieren entre sí (p<0.05 para todas las variables a excepción del número de granos.m<sup>-2</sup>; p<0.10 para número de granos.m<sup>-2</sup>, Tukey).

El RDC.Rep. obtuvo un rendimiento un 23% menor al BH (cuadro 8). La TCC durante el PC fue similar entre estos (cuadro 7), por tanto, la disminución de rendimiento en el RDC.Rep se explicó debido a que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa y moderadas en R1-R4 no permitieron que el RDC.Rep. alcance el IAF crítico hasta el estadio R4 (figura 11) y, por tanto, interceptó menos RS durante los ENC (figura 14). El RDC.Rep. tendió a obtener una mayor EUA que el BH (cuadro 8), lo cual se explicó principalmente debido a que las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa disminuyeron la ETc fuertemente en la etapa del ciclo en que estas deprimieron menos el rendimiento con respecto a las etapas siguientes.

El RDC.PC y el RDC.V-PC obtuvieron rendimientos 33 y 39% menores al BH (cuadro 8). Esto se explicó debido a que las deficiencias hídricas severas en el periodo R1-R4 provocaron una baja TCC en el PC (cuadro 7) y un menor número de granos.m<sup>-2</sup> con respecto al BH. El RDC.PC y el RDC.V-PC evapotranspiraron 56 y 35% menos que el BH. La merma de rendimiento del RDC.V-PC fue similar a la disminución de la ETc con respecto al BH, por lo que obtuvieron similares EUA (cuadro 8). Esto se explicó debido a que ambos estuvieron en confort hídrico durante la etapa vegetativa y el RDC.V-PC se encontró bajo deficiencias hídricas severas en R1-R4, etapa en la que estas afectaron en mayor medida el rendimiento (cuadro 8). El RDC.PC por otro lado presentó deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa las que disminuyeron la ETc sin mayores disminuciones del rendimiento en comparación al RDC.V-PC. Esto determinó que el RDC.PC logre una EUA significativamente mayor al BH, en un 55% (cuadro 8).

## 5. CONCLUSIONES

En la estrategia RD50%BH fue posible obtener el mismo rendimiento que con el BH en todo el ciclo, y a su vez ahorrar el 45% del riego. Sin embargo, no se pudo concluir que el comportamiento productivo se mantenga en años climáticamente diferentes, debido a las PP elevadas registradas en la temporada de estudio durante el PC, las que en caso de ser inferiores podrían disminuir el rendimiento. Esto plantea la necesidad de evaluar esta estrategia de RD en otras condiciones hídricas, a los efectos de dar a conocer la respuesta en rendimiento en condiciones de PP más limitantes durante el ciclo del cultivo.

El rendimiento con BH en todo el ciclo se encontró un 33% por debajo del rendimiento potencial reportado para la misma localidad. La principal limitante para alcanzar este valor fue la alta temperatura durante el PC, la que afectó la duración del llenado de granos, disminuyendo el peso de estos y no el número, ya que la RS diaria en este periodo fue suficiente para alcanzar un número de granos.m<sup>-2</sup> muy elevado.

Las estrategias de RDC disminuyeron el rendimiento en comparación al BH en todo el ciclo. La disminución del rendimiento varió en función del estadio del cultivo en que se produjeron las deficiencias hídricas y la intensidad de las mismas. Las deficiencias hídricas severas en la etapa R1-R4 en el RDC.V-PC disminuyeron el rendimiento, en un 39% con respecto al BH. Esto se debió a que estas deficiencias impidieron lograr el IAF crítico en el PC, por lo que las TCC durante esta etapa fueron bajas y afectaron negativamente el rendimiento. El RDC.V-PC presentó similar EUA con respecto al BH, por lo que no fue una estrategia que haya permitido maximizar el rendimiento, ni la EUA.

La aplicación de RDC permitió el mejor aprovechamiento de las PP, mejorando la EUA. El RDC.PC aumentó la EUA en un 55 % a pesar de obtener un rendimiento 33% menor que el BH. El RDC.Rep. tendió a aumentar la EUA en un 18% con respecto al BH y obtuvo el mayor rendimiento entre las estrategias de RDC. En el RDC.PC y el RDC.Rep. el aumento de la EUA se asoció con la ausencia de riego en la etapa vegetativa.

Las deficiencias hídricas severas en la etapa vegetativa cuando se combinaron con deficiencias hídricas moderadas en el periodo R1-R4 en el RDC.Rep., disminuyeron el rendimiento en un 23 % en relación al BH. Esto se debió a que el cultivo no fue capaz de expresar plasticidad vegetativa en el periodo R1-R4 debido a las deficiencias hídricas en dicha etapa. Por tanto, es conveniente profundizar evaluaciones de estrategias de RD que restrinjan el uso del agua en la etapa vegetativa, manteniendo el confort hídrico en el resto del ciclo del cultivo, a los efectos de desarrollar estrategias de RD que permitan maximizar el rendimiento y la EUA de manera conjunta. De igual forma, es oportuno evaluar la disminución de la intensidad de las deficiencias hídricas en la etapa vegetativa del RDC.Rep., a los efectos de conocer si el rendimiento con deficiencias hídricas moderadas en todas las ENC es similar al rendimiento con deficiencias hídricas moderadas solamente durante el periodo R1-R4, ya que este no difirió del rendimiento con BH.

## 6. RESUMEN

Se realizó un experimento de soja (*Glycine max*, L.) en la estación experimental “Dr. M. A. Cassinoni” en Paysandú, Uruguay, en el verano 2015-16. El ensayo consistió en aplicar riego suplementario y riegos deficitarios en distintas etapas del cultivo y evaluar su efecto en el rendimiento y sus componentes, así como en la producción de MS, la TCC, el IAF, la interceptación de RS y la EUA. Se evaluaron 5 tratamientos según la estrategia de riego aplicada en los distintos momentos del ciclo, siendo estos: BH: bienestar hídrico en todo el ciclo, RDC.PC: riego deficitario controlado en periodo crítico y entre 20 y 40% de AD durante las ENC, RDC.V-PC: riego deficitario controlado en periodos vegetativo y crítico y entre 20 y 40% de AD durante R1-R4, RDC.Rep.: riego deficitario controlado en periodo reproductivo y entre 20 y 40% de AD en la etapa vegetativa, RD50%BH: riego deficitario con el 50% del volumen regado en BH en todo el ciclo. Las deficiencias hídricas fueron provocadas por exclusión de las precipitaciones con simuladores de sequía y el bienestar hídrico mediante riego suplementario. Los riegos deficitarios para todos los tratamientos fueron realizados con el 50% de la lámina neta aplicada al BH en cada evento de riego. El BH rindió 4.9 t.ha<sup>-1</sup>, el RD50%BH fue el único que no presentó diferencias estadísticas con el BH, los tratamientos RDC.PC y RDC.V-PC rindieron un 33 y 39 % menos que el BH, sin diferencias entre estos; RDC.Rep. rindió un 23 % menos que el BH, sin diferencias con los tratamientos RDC.PC y RD50%BH. El BH acumuló 9,8 t.ha<sup>-1</sup> de MS a R4, el RD50%BH no presentó diferencias con este, los tratamientos RDC.V-PC y RDC.Rep. acumularon el 77 y 76% de la MS del BH en R4, respectivamente, sin diferencias entre ellos, y RDC.PC acumuló en 41 % de la MS del BH en R4. El IAF crítico calculado fue de 6.45 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>. A R4 el BH presentó un IAF de 9.14 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>, los tratamientos RDC.Rep. y RD50%BH no presentaron diferencias con este, los tratamientos RDC.PC y RDC.V-PC alcanzaron el 40 y 52 % del IAF del BH, sin diferencias entre estos. Esto provocó que los tratamientos RDC.Rep. y RD50%BH no presentaran diferencias en RS interceptada en el periodo crítico, no así los tratamientos RDC.PC y RDC.V-PC. Los tratamientos RD50%BH y RDC.V-PC no presentaron diferencias con el BH en cuanto a la RS interceptada en R1-R4, no así los tratamientos RDC.PC y RDC.Rep. La TCC en R4-R7 fue en promedio de 90 kg.ha<sup>-1</sup>.día<sup>-1</sup>, tendiendo a diferenciarse entre tratamientos. La MS a R7 del BH fue de 13 t.ha<sup>-1</sup>. El RDC.PC y el RDC.V-PC acumularon significativamente menos MS en R7 que el BH, con un 47 y 72% de la MS con BH. La EUA presentó diferencias entre tratamientos, el RDC.PC obtuvo el mayor valor con 14 kg.mm<sup>-1</sup>, un 55% mayor al BH. Los resultados indican que los riegos deficitarios que presentaron deficiencias hídricas en ENC afectan significativamente el rendimiento, aumentando este efecto cuanto más intensas son las deficiencias en R1-R4, pudiendo aun así aumentar la EUA si no se riega en vegetativo.

Palabras clave: *Glycine max*; Deficiencias hídricas; Riego deficitario; Rendimiento; Biomasa; Índice de área foliar; Eficiencia de uso del agua.

## 7. SUMMARY

An experiment of soybean (*Glycine max*, L.) was carried out at the experimental station "Dr. M. A. Cassinoni "in Paysandú, Uruguay, in the Summer 2015-16. The trial consisted in apply supplementary irrigation and deficit irrigation at different stages of the crop and evaluating its effect on yield and its components, as well as in the DM production and crop growth rate, LAI, radiation intercepted and WUE. Five treatments were evaluated according to the irrigation strategy applied at the different stages of the crop, these were: BH: welfare water throughout the cycle, RDC.PC: regulated deficit irrigation in critical stages and between 20 and 40% of AD during non-critical stages, RDC.V-PC: regulated deficit irrigation in vegetative and critical stages and between 20 and 40% of AD during R1-R4, RDC.Rep.: regulated deficit irrigation in reproductive stages and between 20 and 40% of AD during vegetative stages, RD50%BH: deficit irrigation with 50% of the volume irrigated in BH throughout the cycle. The water deficiencies were caused by exclusion of rainfall with drought simulators and welfare water with supplemental irrigation. The deficit irrigation for all treatments were carried out with 50% of net sheet applied to BH in each irrigation event. The BH yielded 4.9 t.ha<sup>-1</sup>, the RD50%BH was the only one that did not present statistical differences with the BH. RDC.PC and RDC.V-PC yielded a 33 and 39% less than BH, without difference between them, RDC.Rep. yielded 23% less than BH, without differences with RDC.PC and RD50%BH. The BH accumulated 9.8 t.ha<sup>-1</sup> of DM to R4, the RD50%BH did not present differences with this, treatments RDC.V-PC and RDC.Rep. accumulated 77 and 76% of the DM of BH in R4, respectively, without differences between them, and the RDC.PC accumulates in 41% of the DM of the BH in R4. The critical LAI calculated was 6.45 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>. At R4, BH presented an LAI of 9.14 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>, treatments RDC.Rep. and RD50%BH showed no differences with this, treatments RDC.PC and RDC.V-PC reached 40 and 52% of the LAI of BH, without differences between them. This caused that the treatments RDC.Rep. and RD50%BH did not show differences in radiation intercepted in the critical period, but the treatments RDC.PC and RDC.V-PC did not. The treatments RD50%BH and RDC.V-PC did not present differences with the BH in the radiation intercepted in R1-R4, no thus RDC.PC and RDC.Rep. The crop growth rate in R4-R7 was on average 90 kg.ha<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>, tending to differentiate between treatments. The DM to R7 of the BH was 13 t.ha<sup>-1</sup>. The RDC.PC and the RDC.V-PC accumulated significantly less DM in R7 than the BH, with 47 and 72% of the DM with BH. The WUE presented differences between treatments, RDC.PC obtained the highest value of this with 14 kg.mm<sup>-1</sup>, being a 55% greater than BH. The results indicate that deficit irrigation strategies with water deficiencies in non-critical stages significantly affect yield, increasing this effect when more intense deficiencies in R1-R4, even can still increase the WUE if it is not irrigated in vegetative stages.

Keywords: *Glycine max*; Water deficiencies; Deficit irrigation; Yield; Biomass; Leaf area index; Efficiency of water use.

## 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.; Aguirrezabal, L.; Rizzalli, R. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparado. 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. 61-96.
3. \_\_\_\_\_.; Sadras, V. O. 2000b. 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.
4. \_\_\_\_\_.; Caviglia, O. P. 2015. Incrementando la productividad de los recursos. Productividad del agua. In: Simposio Nacional de Agricultura (4°, 2015 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 123-130.
5. Andriani, J. M.; Andrade, F.; Suero, E.; Dardanelli, J. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie*. 11: 737-746.
6. \_\_\_\_\_. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 2 (3): 48-51.
7. 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. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 34 p.
8. Candoğan, B. N.; Yazgan, S. 2016. Yield and quality response of soybean to full and deficit irrigation at different growth stages under sub-humid climatic conditions. (en línea). *Tarım Bilimleri Dergisi*. 22(2): 129-144. Consultado 18 abr. 2017. Disponible en [https://scholar.google.com.uy/scholar?q=Yield+and+Quality+Response+of+Soybean+to+Full+and+Deficit+Irrigation+at+Different+Growth+Stages+under+Sub-Humid+Climatic+Conditions+Burak+Nazmi+CANDO%20%20EANA%20C+Senih+YAZGANA&btnG=&hl=es&as\\_sdt=0%2C5](https://scholar.google.com.uy/scholar?q=Yield+and+Quality+Response+of+Soybean+to+Full+and+Deficit+Irrigation+at+Different+Growth+Stages+under+Sub-Humid+Climatic+Conditions+Burak+Nazmi+CANDO%20%20EANA%20C+Senih+YAZGANA&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5)



9. Canosa, G.; Prieto, C. 2013. Estudio del efecto de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 66 p.
10. Capurro, M. C. 2016. Respuesta del cultivo de soja a distintas dosis y momentos de riego. Tesis Magister. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 129 p.
11. Carballo de Silva, L. 1990. Manejo del riego en soja sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. *Agronomía Tropical* (San José de Guanipa). 40: 35-56.
12. Cárcova, J.; Abeledo, L. G.; López Pereira, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento; crecimiento, partición y componentes. 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, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 75-98.
13. Cardoso Romero, S. 2008. Densidad poblacional en soja [*Glycine max* (L.) Merr.]: efecto sobre el crecimiento y rendimiento de la planta en época de primavera. Tesis Ing. Agr. Santa Clara, Cuba. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. 58 p.
14. Dardanelli, J. L.; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. 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, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 377-406.
15. Debaeke, P.; Aboudrade, A. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*. 21 (4): 433-446.
16. Della Maggiora, 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, INTA. Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.
17. Doorenbos, J.; Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. Rome, FAO. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper no. 33).
18. Doss, B.; Pearson, R.; Rogers, H. 1974. Effect of soil water stress at various growth stages on soybean yield. *Agronomy Journal*. 63: 297-299.

19. Durán, A.; Aguirre, L.; Altamirano, A.; Alvarez, C.; Cayssials, R.; Da Silva, H.; Echeverría, A.; Falco, L.; Liesegang, J.; May, H.; Molfino, J.; Morelli, C.; Panario, D.; Piñeyrúa, J.; Puentes, R.; Sacco, G.; Sganga, J.; Terra, J.; Trambauer, A.; Victoria, C.; Acosta, G.; Palacios, J. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay, Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Esc. 1:1.000.000. Color
20. Farias, J. R.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. Ecofisiología da soja. EMBRAPA. Circular Técnica. no. 48: 1-9.
21. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. pp. 929-931.
22. Fereres, E.; Soriano, M. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58: 147-159.
23. Foster, P.; Rovegno, F. 2015. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fisiológicas de soja sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 68 p.
24. Frederick, J. R.; Bauer, P. J.; Camp, C. 2001. Drought-stress effects on branch and main stem seed yield and yield components of determinate soybean. *Crop Science*. 41: 759-763.
25. García, M. s.f. Cultivos de verano ¿regar o no regar? Montevideo, Facultad de Agronomía. 5 p.
26. \_\_\_\_\_. 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.
27. Gardner, F. P.; Brent Pearce, R.; Mitchel, R. L. 1985. Carbon fixation by crop canopies. In: Gardner, F. P.; Pearce, R. B.; Mitchell, R. L. eds. *Physiology of Crop Plants*. Ames, Iowa, Iowa State University Press. pp. 31-57.
28. Garside, A. L.; Lawn, R. J.; Byth, D. E. 1992. Irrigation management of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in a semi-arid tropical environment. I. Effect of irrigation frequency on growth, development and yield. *Australian Journal of Agricultural Research*. 43(5): 1003-1017.

29. Gerster, G.; Bacigaluppo, S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 42: 63-67.
30. Giménez, L. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glycine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. Agrociencia (Montevideo). 11: 1-9.
31. \_\_\_\_\_.; Böcking, B.; García Petillo, M.; García, C.; Sawchik, J. 2010. Prologo; marco de referencia del seminario. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (1°, 2010 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 3-4.
32. \_\_\_\_\_.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia (Montevideo). 15(2): 100-108.
33. \_\_\_\_\_. 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. 33-41.
34. \_\_\_\_\_. 2014a. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. Agrociencia (Montevideo). 18 (1): 53-64.
35. \_\_\_\_\_. 2014b. ¿Que sabemos del riego de cultivos en Uruguay? Y que falta por investigar. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (3°, 2014 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 22-34.
36. \_\_\_\_\_.; Canosa, G.; Prieto, C.; Grasso, J. P.; Montero, A.; Rameau, M.; Rosa, A.; Arévalo, R. 2014c. Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. Riego suplementario en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. 66 p. (Serie Técnica no. 55).
37. Grasso, J. P.; Montero, J. A. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 56 p.
38. INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2016. Estadísticas climatológicas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 abr. 2016. Disponible en <https://inumet.gub.uy/ServCli/tablasEstadisticas>

39. Kantolic, A. G.; Giménez, P. I.; De La Fuente, E. B. 2003a. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. 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, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
40. \_\_\_\_\_. 2003b. Ecofisiología del cultivo de soja; bases para el manejo y para el aumento del rendimiento potencial. In: Reunión de Actualización en Soja (2ª., 2003, Criadero Don Mario). Trabajos presentados. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Cátedra de Cultivos Industriales. Departamento de Producción Vegetal. p. irr.
41. \_\_\_\_\_.; 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, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 186-187.
42. \_\_\_\_\_. 2008. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja; impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. Revista de la UBA. Facultad de Agronomía. 28(1): 63-88.
43. Karam, R. M.; Sfeir, F.; Mounzer, O.; Roupheal, Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 75: 226-244.
44. Kirda, C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Deficit Irrigation Practices. Water Reports. no. 22: 3-10.
45. Klocke, N. L.; Eisenhauer, D. E.; Specht, J. E.; Elmore, R. W.; Hergert, G. W. 1989. Irrigation soybeans by growth stages in Nebraska. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 5(3): 361-366.
46. Martignone, R. A.; Enrico, J. M.; Bodrero, M. L.; Andriani, J. M. 2010. Factores asociados con la variabilidad de rendimientos entre grupos de madurez en soja. (en línea). Para Mejorar la Producción. no. 45: 25-33. Consultado 19 abr. 2017. Disponible en <http://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-factores-asociados-con-la-variabilidad.pdf>
47. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2016. Anuario estadístico agropecuario 2016. (en línea). Montevideo. 199 p. Consultado

18 nov. 2016. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario2016>

48. Micucci, F. 2004. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua en los cultivos extensivos de la región pampeana argentina. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 13 p.
49. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.
50. Mondino, M.; Gómez, D. 2006. Evolución de la intercepción de la radiación incidente y la producción de biomasa en soja de siembras extratempranas a diferentes espaciamientos. In: Congreso de Soja del MERCOSUR (3°, 2006, Rosario, Argentina). Trabajos presentados. Santiago del Estero, Argentina, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp. 83-86.
51. Moutonnet, P. 2002. Yield response factors of field crops to deficit irrigation. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Deficit Irrigation Practices. Water Reports. no. 22: 11-15.
52. Neyshabouri, M. R.; Hatfield, J. L. 1986. Soil water deficit effects on semi-determinate and indeterminate soybean growth and yield. Field Crops Research. 15(1): 73-84.
53. Otegui, M. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. Manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. Informaciones Agronómicas. no. 44: 16-20.
54. Otero, A.; Montoya, F.; Ferreira, A.; Canepa, P. 2015. Irrigation water effect in soybean crop. Agrociencia (Montevideo). 19(3): 37.
55. Prieto Angueira, S.; Prieto Garra, D. R.; Angella, G. A. 2016. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. (en línea). Santiago del Estero, INTA. Santiago del Estero/ Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Agronomía y Agroindustrias. 10 p. Consultado 17 abr. 2017. Disponible en [http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-evaluacion\\_de\\_diferentes\\_estrategias\\_de\\_riego\\_deficitario\\_controlado\\_en\\_el\\_cultivo\\_de\\_soja.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-evaluacion_de_diferentes_estrategias_de_riego_deficitario_controlado_en_el_cultivo_de_soja.pdf)
56. Rodríguez, H. J.; De Battista, J. J.; Dardanelli, J. L.; Pessolani, B.; Castellá, M.; Chaix, X. s.f. Efecto del riego en soja y maíz en un vertisol de Entre Ríos.

2. Crecimiento, rendimiento y sus componentes. Concepción del Uruguay, INTA EEA Concepción del Uruguay. pp. 1-8.

57. Rosadi, R. A.; Afandi, S.; Senge, M.; Ito, K. 2005. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. *Paddy Water Environment*. 3: 219-223.
58. 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.
59. Salvagiotti, F.; Enrico, J. M.; Bodrero, M.; Bacigaluppo, S. 2010. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. (en línea). Para Mejorar la Producción. no. 45: 151-154. Consultado 19 abr. 2017. Disponible en <http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-produccion-de-soja-y-uso-eficiente-de-los-recursos.pdf>
60. Sawchik, J. 2012. Necesidades de riego en cultivos y pasturas. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 57-68.
61. \_\_\_\_\_; Siri, G.; Ayala, W.; Barrios, E.; Bustamante, M.; Ceriani, M.; Gutierrez, F.; Mosqueira, J.; Otaño, C.; Perez, M.; Piñeiro, G.; Pinto, P.; Terra, J.; Zarza, R. 2015. El sistema agrícola bajo amenaza; ¿qué aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? In: Simposio Nacional de Agricultura (4º., 2015, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 149-168.
62. Sincik, M.; Candoğan, B.; Demirtas, C.; Buyukcangaz, H.; Yazgan, S.; Goksoy, A. 2008. Deficit irrigation of soybean [*Glycine Max* (L) Merr.] in a sub-humid climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 194(3): 200-205.
63. Sinclair, T. R. 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *Field Crops Research*. 15(2): 125-141.
64. Specht, J. E.; Chase, K.; Macrander, M.; Graef, G. L.; Chung, J.; Markwell, J. P.; Lark, K. G. 2001. Soybean response to water. *Crop Science*. 41(2): 493-509.
65. Sweeney, D. W.; Granade, G. V. 2002. Effect of a single irrigation at different reproductive growth stages on soybean planted in early and late June. *Irrigation Science*. 21(2): 69.

66. Toledo, R. 2013. Soja; su ecofisiología y manejo. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 31 p. Consultado 15 abr. 2017. Disponible en <http://www.buscagro.com/www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Soja-su-ecofisiologia-y-manejo.pdf>
67. \_\_\_\_\_. 2016. Algunos aspectos de la ecofisiología del cultivo de soja. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 10 p. Consultado 15 abr. 2017. Disponible en <https://ansenuza.unc.edu.ar/comunidades/bitstream/handle/11086.1/1171/Algunos%20aspectos%20de%20la%20ecofisiologia%20del%20cultivo%20de%20Soja.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
68. Trout, T.; Bausch, W.; Buchleiter, G. 2010. Does deficit irrigation give more crop per drop? In: The Annual Central Plains Irrigation Conference (22nd., 2010, Kearney, Nebraska). Proceedings. Kansas, Colby. pp. 36-40.
69. Vaiman, N.; Elizalde, J.; Lallana, V. 2010. Intercepción de radiación, área foliar y rendimiento de un cultivo de soja en el departamento Paraná. (en línea). Paraná, Entre Ríos, Universidad Nacional de Entre Ríos. 11 p. Consultado 14 abr. 2016. Disponible en [http://www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/WEBFV\\_2010/FVpdf/tema4\\_UNER\\_intercepcion%20de%20radiacion.pdf](http://www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/WEBFV_2010/FVpdf/tema4_UNER_intercepcion%20de%20radiacion.pdf)
70. Van Ittersum, M. K.; Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*. 52: 197-208.
71. Vilches, M. S.; Costanzo, M. 2011. Consumo hídrico del cultivo de soja (*Glycine max*, Merrill) en Zavalla, Santa Fé. (en línea). *Revista Agromensajes*. 31 (6): s.p. Consultado 15 abr. 2017. Disponible en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/31/2AM31.htm>
72. Wani, S.; Heng, L.; Vajja, N. 2012. Soybean. In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. eds. *Crop yield response to water*. Rome, FAO. pp. 124-131 (FAO. Irrigation and Drainage Paper no. 66).