

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RESPUESTA PRODUCTIVA DE SOJA A DIFERENTES ESTRATEGIAS DE  
RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO**

**por**

**Agustín PÉREZ FERREIRA**

**Alberto VELARA ARANDA**

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

**MONTEVIDEO**

**URUGUAY**

**2018**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. (Dr.) Luis Giménez

-----

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli

-----

Ing. Agr. (MSc.) Álvaro Otero

Fecha: 27 de noviembre de 2018

Autores: -----

Agustín Pérez Ferreira

-----

Alberto Velara Aranda

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mis padres y hermanos los cuales siempre estuvieron presente durante el trascurso de la carrera, en todo momento demostraron su apoyo incondicional, haciendo que esto sea posible. Mi familia y mis amigos, los cuales siempre estuvieron a las órdenes, también compañeros que me ha dejado este camino recorrido. A nuestro tutor el Ing. Agr. Dr. Luis Giménez por habernos orientados y aconsejado en la realización de este trabajo, a Richard y Matías por el apoyo y la disposición en el trabajo de campo, funcionarios del laboratorio de la EEMAC. Además a mi compañero de tesis, Beto por su voluntad y compromiso con el trabajo y así como también a los compañeros Camps, Lemos, Canela y Fermín. Al personal de biblioteca y a la Lic. Sully Toledo por su colaboración para la realización del presente trabajo.

Agustín.

A mis padres, que a lo largo de toda la carrera hicieron todo lo posible para que pudiera realizarla, amigos y compañeros, a nuestro tutor de tesis Ing. Agr. Dr. Luis Giménez y a todos nuestros docentes que formaron parte de nuestra formación profesional.

Alberto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1. SOJA EN EL URUGUAY.....	3
2.1.1. <u>Historia del cultivo de soja</u> .....	3
2.2. <u>CARACTERÍSTICAS ECOFISIOLÓGICAS</u> .....	4
2.2.1. <u>Germinación y emergencia</u> .....	4
2.2.2. <u>Estados vegetativos</u> .....	5
2.2.3. <u>Estados reproductivos</u> .....	5
2.3. <u>AMBIENTES DE PRODUCCIÓN</u> .....	6
2.3.1. <u>Fotoperíodo</u> .....	6
2.3.2. <u>Temperatura</u> .....	7
2.3.3. <u>Radiación solar</u> .....	7
2.3.4. <u>Agua</u> .....	8
2.4. <u>CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA</u> .....	9
2.4.1. <u>Radicación solar-heliofanía real</u> .....	9
2.4.2. <u>Temperatura del aire</u> .....	9
2.4.3. <u>Precipitaciones</u> .....	9
2.4.4. <u>Evapotranspiración</u> .....	10
2.4.5. <u>Características generales de los suelos</u> .....	10
2.5. <u>DISPONIBILIDAD HÍDRICA</u> .....	11
2.5.1. <u>Producción de materia seca</u> .....	11
2.5.2. <u>Rendimiento</u> .....	12
2.5.3. <u>Componentes del rendimiento</u> .....	13
2.5.3.1. <u>Número de granos por unidad de área</u> .....	13
2.5.3.2. <u>Peso de granos promedio</u> .....	14
2.5.4. <u>Subcomponentes del rendimiento</u> .....	15
2.5.4.1. <u>Número de nudos</u> .....	15
2.5.4.2. <u>Número de vainas por nudo</u> .....	15
2.5.4.3. <u>Número de granos por vaina</u> .....	16
2.6. <u>CUANTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA</u> .....	17
2.6.1. <u>Requerimientos diarios de agua</u> .....	17
2.6.2. <u>Consumo de agua</u> .....	17
2.6.3. <u>Eficiencia del uso del agua</u> .....	18
2.7. <u>DEFICIENCIAS HÍDRICAS</u> .....	19
2.8. <u>RIEGO</u> .....	20

2.8.1. <u>Manejo de agua de riego</u> .....	21
2.8.2. <u>Respuesta al riego suplementario</u> .....	22
2.8.3. <u>Riego deficitario</u> .....	23
2.9. <u>HIPÓTESIS</u> .....	25
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	26
3.1. <u>LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO</u> .....	26
3.1.1. <u>Manejo experimental</u> .....	26
3.1.2. <u>Tratamientos</u> .....	27
3.1.3. <u>Precipitaciones efectivas y riego efectivo en las estrategias de riego evaluadas</u> .....	28
3.2. <u>DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO</u> .....	29
3.2.1. <u>Diseño experimental</u> .....	29
3.3. <u>DETERMINACIONES REALIZADAS</u> .....	29
3.3.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u> .....	29
3.3.2. <u>Determinaciones a cosecha</u> .....	30
3.4. <u>ANÁLISIS DE DATOS</u> .....	30
3.5. <u>CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO</u> .....	30
3.5.1. <u>Precipitaciones</u> .....	30
3.5.2. <u>Radiación solar incidente</u> .....	31
3.5.3. <u>Temperaturas</u> .....	32
3.5.4. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u> .....	33
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	37
4.1. <u>DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO</u> .....	37
4.1.1. <u>Materia seca acumulada</u> .....	37
4.1.2. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento</u> .....	39
4.1.3. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes y subcomponentes del rendimiento</u> .....	42
4.1.4. <u>Relación entre el rendimiento y sus componentes</u> .....	44
4.1.5. <u>Productividad del agua</u> .....	45
4.1.6. <u>Evapotranspiración del cultivo y eficiencia de uso del agua en bienestar hídrico</u> .....	47
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	50
6. <u>RESUMEN</u> .....	51
7. <u>SUMMARY</u> .....	52
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	53
9. <u>ANEXOS</u> .....	63

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas principales del suelo del campo experimental de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” .....	26
2. Calendario de eventos fenológicos.....	27
3. Precipitaciones efectivas (mm) y riego efectivo (mm), en las estrategias de riego evaluadas.....	29
4. Agua efectiva total recibida (mm) por etapas, en las estrategias de riego evaluadas.....	40
5. Número de granos por metro cuadrado y peso de mil granos, en las estrategias de riego evaluadas.....	42
6. Número de granos por planta, número de vainas por planta y número de granos por vaina, en las estrategias de riego evaluadas.....	43
7. Productividad del agua, en las estrategias de riego evaluadas.....	46
8. Resultados comparativos de evapotranspiración del cultivo, rendimiento y eficiencia del uso del agua en el cultivo de soja para la misma localidad.....	48
Figura No.	
1. Precipitaciones promedio totales (mm) ocurridas en Paysandú entre los meses de noviembre y marzo para la serie histórica 2002 a 2014 y para el año agrícola 2014-15.....	31
2. Radiación solar incidente diaria promedio (MJ/m <sup>2</sup> /día) ocurrida en Paysandú entre los meses de noviembre y marzo para la serie histórica 2002 a 2014 y para el año agrícola 2014-15.....	32
3. Temperaturas medias (C°) ocurridas en Paysandú entre los meses de noviembre y marzo para la serie histórica 2002 a 2014 y para el año agrícola 2014-15.....	32

4. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento con bienestar hídrico en todo el ciclo.....	33
5. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario controlado en periodo crítico y el resto del ciclo deficiencias hídricas.....	34
6. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario controlado en el periodo vegetativo y el periodo crítico y el resto del ciclo deficiencias hídricas.....	34
7. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario controlado desde R1 a R6 y el resto del ciclo deficiencias hídricas.....	35
8. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario en todo el ciclo.....	36
9. Materia seca total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y agua efectiva (mm), en las estrategias de riego evaluadas.....	37
10. Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), en las estrategias de riego evaluadas.....	39
11. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el número de granos ( $\text{m}^2$ ), en las estrategias de riego evaluadas.....	44
12. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el peso de mil granos (g), en las estrategias de riego evaluadas.....	45
13. Evolución de la evapotranspiración del cultivo diaria ( $\text{mm día}^{-1}$ ) según días post-emergencia, en el tratamiento de bienestar hídrico.....	47

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción agrícola en Uruguay ha crecido en los últimos 15 años, un aspecto relevante a considerar en este crecimiento de la superficie de cultivos es la incorporación de cambios tecnológicos. Se destacan la adopción masiva de la siembra directa, la utilización generalizada de materiales genéticamente modificados, la incorporación de nuevas moléculas en los defensivos agrícolas y la modernización del parque de maquinaria (Giménez, 2012).

Durante el año agrícola 2017/18, la superficie total sembrada con cultivos de verano con destino a grano seco fue de 1,2 millones de hectáreas. El cultivo de soja, con 1,1 millones de hectáreas aportó el 92 % del área. El rendimiento medio de soja a nivel nacional fue estimado en  $1.214 \text{ kg ha}^{-1}$ , el rendimiento promedio de la soja con riego se estimó en  $2.847 \text{ kg ha}^{-1}$ , un 139 % superior al rendimiento de secano. Esta variación en los rendimientos se explica por el déficit hídrico que afectó a los cultivos de verano en la última zafra (MGAP. DIEA, 2018).

En los cultivos de verano realizados en secano, la principal limitante es la disponibilidad hídrica. La baja capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, la variabilidad de las precipitaciones (PP) y las elevadas demandas atmosféricas provocan habitualmente condiciones de deficiencias hídricas durante el desarrollo de los cultivos que son limitantes para la obtención de rendimientos elevados y estables.

La intensidad, duración y el momento de ocurrencia de las deficiencias hídricas, determina su efecto sobre el rendimiento en soja. El riego suplementario es una herramienta que permite atenuar los periodos de estrés hídrico. Es necesario conocer la respuesta productiva a diferentes disponibilidades hídricas, para poder definir la estrategia de riego más adecuada.

El riego deficitario (RD), es una estrategia basada en la aplicación de agua por debajo de los requerimientos totales, permitiendo mejorar la eficiencia en el uso del agua (EUA) y el ahorro de agua. El riego deficitario controlado (RDC) se basa en gestionar los niveles de déficit hídrico al que se somete al cultivo a lo largo de su ciclo productivo atendiendo a la sensibilidad al déficit hídrico (intensidad y duración), en cada una de las fases de su ciclo (Girona et al., 2014). Lo que produce un incremento en la productividad del agua logrando un uso más eficiente.

A nivel nacional la información sobre la respuesta productiva de la soja a diferentes estrategias de RD y RDC es escasa. Por tal motivo, el estudio de ambas estrategias de riego es importante para maximizar los rendimientos dentro de las posibilidades que brindan los diferentes ambientes productivos, de forma tal que mejore la rentabilidad de los sistemas de producción agrícola que incluyen soja con riego.

El trabajo tuvo por objetivo principal evaluar la respuesta productiva de soja a estrategias de RD y RDC frente a condiciones de bienestar hídrico (BH) durante el ciclo del cultivo.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. SOJA EN EL URUGUAY

#### 2.1.1. Historia del cultivo de soja

En el año 1964 se realizó el primer cultivo de soja comercial en Uruguay, en un total de 3388 hectáreas, con un rendimiento promedio de 301 kg ha<sup>-1</sup> (MGAP. DIEA, 2015). Aunque según, Boerger, citado por Shurtleff y Aoyagi (2009), la soja fue introducida en el país en 1911.

La agricultura extensiva de secano se concentra en la región litoral Oeste del país abarcando principalmente los departamentos de Colonia, Soriano, Río Negro y Paysandú. Esta es la zona de agricultura extensiva por excelencia desde hace más de 50 años luego del desplazamiento desde la zona Sur del país (Canelones y alrededores de Montevideo, Blum et al., 2008).

La soja aparece como un cultivo de cierta relevancia hacia fines de la década de los 70 donde al influjo de un acuerdo comercial con Taiwán que permitió un acceso a mayores precios, hizo posible que el área sembrada aumentara alcanzando una superficie máxima de casi 51 mil hectáreas. La superficie baja con el cese de ese acuerdo y es recién a fines de la década del 80 que se retoman esos niveles de área sembrada. En la década de los 90 el cultivo pasa a formar parte de la crisis de la agricultura uruguaya y el área sembrada no supera las 10.000 hectáreas (Blum et al., 2008).

En los comienzos del nuevo siglo, siguiendo lo ocurrido en los otros países del Mercosur, se comienza a dar en el país un fuerte proceso de expansión agrícola impulsado principalmente por el crecimiento del área de soja. Las causas que generan esta expansión son diversas, siendo las principales: la generalización del uso de los cultivos transgénicos y la siembra directa, las medidas de políticas económica en Argentina, la estandarización de labores que incrementan la competitividad, etc. (Arbeletche y Carballo, 2009).

Estas causas generaron la expansión de la agricultura también en zonas denominadas como no tradicionales para este rubro, tal es el caso de las regiones centro (Durazno), Noreste (Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo) y Sur (San José). No obstante, el cultivo de soja en estas regiones representa apenas el 8 % del total del área sembrada (Blum et al., 2008).

En la temporada 2017/18 la superficie total sembrada con cultivos de verano con destino a grano seco fue de 1,2 millones de hectáreas. El cultivo de soja, presentó 1,1 millones de hectáreas y aportó el 92 % del área de verano y su producción fue

estimada en 1,3 millones de toneladas, un 41 % menos que en la zafra anterior. El rendimiento medio del cultivo de soja a nivel nacional fue estimado en 1.214 kg ha<sup>-1</sup> sembrada, lo que implica una disminución del 59 % comparado con el rendimiento de la zafra anterior que fue de 2.951 kg ha<sup>-1</sup> (record histórico registrado en el país). La superficie de soja regada fue estimada en casi 13,7 mil hectáreas, incrementándose en un 52 % en relación a la zafra anterior. El rendimiento promedio de la soja con riego se estimó en 2.847 kg ha<sup>-1</sup>, un 139 % superior al rendimiento de secano. Esta variación en los rendimientos se explica por el déficit hídrico que afectó a los cultivos de verano en la última zafra, en comparación con las condiciones favorables que se registraron en el verano 2016/17 (MGAP. DIEA, 2018).

El complejo es esencialmente exportador del grano de soja e involucra a más del 90 % de la producción y una bajísima industrialización de la producción. Se destaca una presencia importante de actores argentinos en la fase primaria y de transnacionales en la fase de acopio y exportación (Blum et al., 2008).

## 2.2. CARACTERÍSTICAS ECOFISIOLÓGICAS

La escala de desarrollo más utilizada, tanto por los investigadores como por los asesores y productores, es la que describieron Fehr y Caviness (1977). Esta escala diferencia dos etapas principales, una fase vegetativa (V), durante las que aparecen y se expanden las hojas y otra fase reproductiva (R), caracterizada por la aparición y el crecimiento de flores, frutos y semillas; además, durante gran parte de la fase reproductiva prosigue la aparición de las hojas.

Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo (sitio, fecha de siembra, densidad), ya que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50 % de las plantas del cultivo (Kantolic et al., 2003a).

### 2.2.1. Germinación y emergencia

El crecimiento comienza con la germinación de la semilla, esto es cuando absorbió el 50-55 % de su peso en agua (Baigorri, 1997). Según Kantolic et al. (2003a), la germinación es una de las etapas más críticas, ya que aun cuando las condiciones térmicas sean favorables, la humedad del suelo, la profundidad de siembra o el estado de la superficie del suelo, son importantes en el éxito de implantación del cultivo y claves en el crecimiento de las plántulas.

Según Sadras et al. (2000), en primer lugar, la raíz primaria se elonga e incrementa su grosor, luego el hipocótilo se extiende dirigiéndose hacia la superficie del suelo, empuja los cotiledones y el epicótilo. Las raíces laterales comienzan a crecer

desde la raíz principal y finalmente, los cotiledones emergen alcanzando el estadio VE. Con posterioridad a la emergencia, el hipocótilo se endereza desde la posición arqueada y cesa su crecimiento cuando los cotiledones se expanden. Luego, la emergencia y el despliegue de hojas unifoliadas indican el inicio del estadio VC cuando el meristema apical queda expuesto.

Los nutrientes y las reservas de alimento en los cotiledones cubren las necesidades de la planta joven durante la emergencia y por 7 a 10 días post-emergencia (Ferh y Caviness, 1977). Durante ese tiempo los cotiledones pierden el 70 % de su peso seco, luego de V1 la fotosíntesis de las hojas en desarrollo es suficiente para que la planta se mantenga a sí misma (Ritchie et al., 1994).

### 2.2.2. Estados vegetativos

En los estados vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en consideración el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Para definir si una hoja se encuentra totalmente desarrollada es necesario observar si la hoja superior, ubicada en el nudo inmediatamente superior no se encuentra enrollada, si los bordes de los folíolos no se están tocando, la hoja inferior se considera desarrollada y el nudo se cuenta. Las dos primeras son unifoliadas y opuestas; las siguientes son trifoliadas y alternas. En la axila de cada hoja existen yemas que pueden desarrollar ramas, racimos florales, o permanecer inactivas (Kantolic et al., 2003a).

En V2 las raíces laterales se expanden rápidamente en sentido horizontal y generalmente son infectadas por *Bradyrhizobium japonicum*, dicha bacteria causa la formación de nódulos, los cuales aportan gran parte del nitrógeno requerido por la planta, mediante la fijación biológica de nitrógeno (Sadras et al., 2000).

### 2.2.3. Estados reproductivos

La fase reproductiva se caracteriza por el cambio de estado de un meristema axilar, posteriormente la diferenciación floral progresa en los restantes meristemas de la planta, y cuando alcanza el meristema apical, cesa la diferenciación de hojas (Sadras et al., 2000).

Según Fehr y Caviness (1977), los estadios reproductivos son denominados por la letra R seguida por un número del 1 al 8 que describen el periodo floración-madurez. Los estadios reproductivos comprenden cuatro distintas fases de desarrollo de la planta, ellos son floración (R1 y R2), crecimiento de vainas (R3 y R4), crecimiento de granos (R5 y R6) y maduración de la planta (R7 y R8).

La apertura de la primera flor da comienzo a la fase de floración, que comienza

en una posición intermedia del tallo principal y progresa luego hacia los nudos superiores e inferiores y desde la base hacia el extremo de las ramificaciones. El desarrollo de vainas ocurre luego de la fecundación, que generalmente ocurre en el mismo día o el anterior a la apertura de la flor. La longitud y el ancho máximos de la vaina se alcanzan pocos días después de floración. Una vez que las vainas alcanzan su máxima longitud, comienza a hacerse evidente el crecimiento de los granos. Entre los estados R5 y R6 se alcanzan los valores máximos de altura, número de nudos y área foliar. La madurez fisiológica se alcanza cuando cesa la acumulación de materia seca (MS) en el grano. En R8 se alcanza la madurez en toda la planta, entre 5 y 10 días después de observada la primera vaina madura (Kantolic et al., 2003a).

Entre R3 y R4 comienza el período crítico (PC) en la determinación del rendimiento, el cual se extiende hasta R6. El subperíodo entre R4.5 y R5.5 es donde se completa la floración y las vainas y semillas pequeñas pueden abortar, bajo condiciones ambientales no adecuadas. En situaciones desfavorables durante el periodo R6 y R6.5, pueden acortar el periodo llenado de grano y disminuir el peso de los granos (PG) afectando el rendimiento. En cambio, en el periodo R6.5 y R7 las condiciones adversas producen efectos de menor magnitud, debido a que las semillas ya han acumulado una gran proporción de su peso seco total (Sadras et al., 2000).

Durante el PC del cultivo, cualquier deficiencia en humedad de suelo, nutrientes, luz, defoliación por orugas, enfermedades foliares y ataque de chinches, repercutirá en el rendimiento. El período entre R4.5 y R5.5 es el más crítico ya que ha finalizado la floración y las vainas y semillas más jóvenes son más propensas a abortar en condiciones de estrés. La reducción del rendimiento se debe principalmente a la caída en el número de vainas por planta, si bien bajo condiciones favorables para el cultivo luego de R5.5, el PG puede compensar en parte la caída del rendimiento ocurrida durante el PC, esta compensación está limitada genéticamente (Toledo, 2013).

## 2.3. AMBIENTES DE PRODUCCIÓN

### 2.3.1. Fotoperíodo

La soja es una especie de día corto, con respuesta cuantitativa. El fotoperíodo regula gran parte de las fases reproductivas: la iniciación floral, la floración, la fructificación y el llenado de granos, determinando cuando comienzan y cuando finalizan las diferentes etapas, además de la tasa con que progresan los cambios dentro de la planta (Kantolic et al., 2003a).

Tal como menciona Baigorri (2000) al igual que Bodrero (2003), aun cuando los cambios se producen en los meristemas, el sitio de percepción del estímulo son las hojas. En general, los cultivares comerciales de soja adquieren la madurez para

responder al estímulo cuando despliegan la primer hoja trifoliada. Se considera que en ese estado la planta posee un área foliar suficiente, para percibir el estímulo fotoperiódico.

A diferencia de la temperatura que influye durante todo el ciclo del cultivo, el fotoperíodo comienza su regulación cuando termina la fase juvenil o pre-inductiva (posterior a V1), es decir la inducción floral puede ocurrir en cualquier estadio después del desarrollo de la hoja unifoliada (Hicks, citado por Toledo, 2013). En general a partir de V2 la planta comenzaría a ser sensible al estímulo fotoperiódico, dicho estímulo culminaría en el estado de madurez fisiológica R7 (Toledo, 2013).

El fotoperíodo crítico, valor a partir del cual cada grupo de madurez (GM) aumenta la duración de la etapa VE a R1 y la sensibilidad fotoperiódica son diferentes según el genotipo. Los denominados GM menores o bajos (II, III, y IV) requieren mayor fotoperíodo para la inducción (menos sensibles); en cambio los GM mayores o altos (V, VI, VII, VIII y IX) se inducen con menor fotoperíodo (más sensibles, Toledo, 2013). Los 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).

### 2.3.2. Temperatura

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo del cultivo, pero los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo de las fases de desarrollo. Para que se cumpla la fase de germinación-emergencia se han calculado temperaturas bases entre 6 y 9 °C, temperaturas óptimas entre 25 y 30 °C y una máxima de 40 °C. A medida que avanza el ciclo ontogénico, la temperatura base tiende a disminuir y se modifica el rango de temperaturas óptimas (Kantolic et al., 2003a).

La duración de una fase depende de la temperatura, esta es determinante en la duración de los distintos estados fenológicos del cultivo. La relación entre la duración de una fase y la temperatura no es lineal, y se prefiere caracterizar la longitud de una etapa a través de su inversa. Esta función inversa de la duración es llamada tasa de desarrollo y su unidad es 1/día. En general esta tasa aumenta linealmente entre la temperatura base y la temperatura óptima donde se incrementa la velocidad con que se cumple cada etapa; entre la temperatura óptima y la temperatura máxima la tasa disminuye. Por debajo de la temperatura base y por encima de la máxima el desarrollo prácticamente se detiene y la duración de la fase tiende a ser infinita (Sadras et al., 2000).

### 2.3.3. Radiación solar

La radiación solar (RS) incidente varía con la ubicación geográfica y la época

del año, y aun cuando su magnitud está fuera del manejo agronómico, ciertas prácticas culturales, como la elección de la fecha de siembra y del genotipo permiten adecuar el ciclo del cultivo para maximizar su aprovechamiento. De la RS total incidente, solo una fracción es realmente aprovechada por el cultivo, la radiación fotosintéticamente activa del espectro visible (RFA) ubicada entre 400 y 700 nanómetros (Kantolic et al., 2003a).

La cantidad de RS interceptada acumulada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la dinámica de intercepción de dicho cultivo. Esta a su vez está ligada a la evolución de la superficie foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie, o sea el índice de área foliar (IAF, Maddoni et al., citados por Kantolic et al., 2003a). A su vez Kantolic et al. (2003a) afirmaron que es importante generar en forma temprana el IAF que permita interceptar rápidamente la mayor proporción de la RS incidente y que este se mantenga durante el mayor tiempo posible.

Según indican Gaso y Núñez (2015), los máximos potenciales de rendimiento son explorados con aquellas combinaciones de ciclo del cultivo y fecha de siembra que permite localizar el período de formación y llenado de vainas en los momentos de mayor RS disponible (fin de diciembre - enero).

#### 2.3.4. Agua

Tal como afirman Giménez y García (2009), las consecuencias de las deficiencias hídricas sobre el crecimiento y el rendimiento en grano de los cultivos, depende de los momentos del ciclo en que ocurran y de las magnitudes que presenten las mismas. La disponibilidad hídrica es uno de los factores abióticos más limitantes cuando la producción se realiza en secano. En el caso que se apliquen tecnologías que aumenten la EUA como la siembra directa, el manejo adecuado de los barbechos, etc. Es mayor la probabilidad de aumentar los rendimientos (Baigorri y Croatto, 2002).

Las tres características más relevantes de la sequía que determinan el efecto sobre el cultivo, son la intensidad, la duración y el momento de ocurrencia en relación con el estado de desarrollo del cultivo. Las deficiencias hídricas pronunciadas y duraderas, generan en la planta una situación de estrés hídrico que afecta su normal funcionamiento (Andrade et al., 2000a).

Según afirman De Melo et al. (2011), para una óptima producción debe haber agua disponible (AD) a la siembra, para la germinación, entre 15 y 50 % de la capacidad de retención hídrica del suelo. Las deficiencias hídricas al comienzo de las etapas reproductivas disminuyen el área foliar y la eficiencia de conversión, aumentan el aborto de estructuras reproductivas. El aborto puede ser compensado total o parcialmente por la fijación de nuevos frutos, más granos por fruto, y/o por la producción de semillas más pesadas una vez aliviado el estrés. La disminución del tamaño de la fuente fotosintética

reduce el rendimiento en la medida que el cultivo sea afectado en el PC. Las sequías posteriores a R6 afectan principalmente el PG, mientras que aquellas que ocurren entre R5 y R6 (llenado temprano) afectan principalmente el número de granos (NG) fijados (Andrade et al., 2000a).

## 2.4. CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA

### 2.4.1. Radiación solar-heliofanía real

La heliofanía real media presenta una distribución espacial mínima en toda el área, es decir que se observa una relativa homogeneidad con una tendencia de los promedios anuales a mayores valores en el Noroeste, producto de una menor nubosidad y humedad relativa en promedio, sumado a una mayor insolación astronómica por su menor latitud. Los valores medios de horas de insolación media diaria sobre el país se sitúan en 7 horas con los menores valores situados al Sureste (Rocha) y los máximos al Noroeste (Salto y Artigas, Castaño et al., 2011).

Existe una alta dependencia en la producción de biomasa a la tasa fotosintética, con adecuada disponibilidad de agua y nutrientes; esta combinación de factores óptimos, en latitudes más altas, es función directa de la sincronización de la fecha de siembra del cultivo de ciclo adecuado con el momento del año de mayor duración del día, el solsticio de verano, de manera que coincida con el período de llenado de granos (Melgar et al., 2011).

### 2.4.2. Temperatura del aire

La temperatura varía desde 19,8 °C en la zona Noroeste, hasta unos 16,6 °C en la costa Sur del país. Con una temperatura media anual de 17,7 °C. Las isotermas tienen una tendencia incremental general desde el Sur hacia el Noroeste. En los meses de enero y febrero es cuando se dan las temperaturas medias más altas y las mínimas se dan en los meses de junio y julio. Las temperaturas extremas medias del aire sobre el país presentan durante todo el año un gradiente creciente de Sur a Norte. Los meses más cálidos y fríos son enero y julio respectivamente (Castaño et al., 2011).

### 2.4.3. Precipitaciones

La distribución de valores medios mensuales y anuales obtenidos en base a unas 400 estaciones pluviométricas de la red pluviométrica nacional, tiene contrastes poco marcados aunque definidos tanto sobre el territorio como a lo largo del año (Severova, 1997). Según indicaron Castaño et al. (2011), los valores medios de PP acumulada anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 mm con los menores valores situados al Suroeste (departamento de Colonia) y los máximos al Noreste

(departamentos de Rivera y Artigas). El gradiente por lo tanto es incremental de Suroeste a Noreste. En cuanto a la distribución espacial a lo largo del año, se observa el cambio en el gradiente de la PP, de Oeste a Este en el invierno a un gradiente casi de Sur a Norte para los meses de verano y otoño.

Según indica Severova (1997), a pesar de la distribución de valores medios, las PP en el país se caracterizan por su extremada irregularidad y variabilidad. Se han producido extensos períodos de sequía, como los registrados en 1891-94, 1916-17, 1942-43, 1964-65 y 1988-89. También son hechos frecuentes años con abundantes PP como lo fueron 1914, 1959, 1983 y 1992.

#### 2.4.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua se transfiere desde el suelo hacia la atmósfera, incluyendo la evaporación desde la superficie del suelo o de la planta y la transpiración a través de los tejidos. La ET puede expresarse como flujo de calor latente por unidad de área o su equivalente en lámina de agua por unidad de área (Burman et al., 1983).

La tasa de ET de un cultivo está influenciada por la RS, la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento, variables meteorológicas que determinan la demanda atmosférica y afectan la cantidad de agua que el cultivo puede absorber para diferentes condiciones de humedad edáfica, estado de crecimiento y cobertura vegetal (Gardner et al., 1985).

Los valores medios de ET acumulada anual, estimada por el método de Penman-Monteith, se sitúan entre 1000 y 1200 mm, con los menores valores al Sureste y los máximos al Noroeste del país. La ET presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano (160-185 mm/mes), seguido de la primavera (95-105 mm/mes), el otoño (65-80 mm/mes) y el invierno (25-35 mm/mes). En cuanto al comportamiento histórico se destaca una baja variabilidad interanual, la cual es un poco más alta durante el verano y baja en invierno (Castaño et al., 2011).

#### 2.4.5. Características generales de los suelos

Según señalan Durán et al. (1999), la predominancia de suelos con un horizonte superficial oscuro, rico en materia orgánica, bien estructurado en condiciones naturales y con dominancia de arcillas de carga permanente, que cumple los requisitos del horizonte mólico (melánico), característica de los suelos del Uruguay que da lugar a áreas importantes de Molisoles (Brunosoles éutricos).

La mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura en el país

presentan una capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) que varía entre 80 y 160 mm (Molfino y Califra, 2001). En las mejores situaciones, la CAAD de los suelos cubre aproximadamente la tercera parte de las evapotranspiración del cultivo (ETc) estimadas para los cultivos de verano en la región (DellaMaggiora et al., 2000). Dada la escasa CAAD de los suelos del país, es notoria la elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos y en secano, las recargas provienen fundamentalmente de las PP (Giménez y García Petillo, 2011).

## 2.5. DISPONIBILIDAD HÍDRICA

### 2.5.1. Producción de materia seca

Para maximizar la producción de biomasa de un cultivo que se encuentra en crecimiento, es conveniente que las plantas se encuentren expuestas a una alta amplitud térmica, con temperaturas diurnas óptimas para la fotosíntesis y temperaturas nocturnas que disminuyan la respiración. Así de este modo, se obtendrá un desarrollo más prolongado en el tiempo, que aumentará el aprovechamiento de la RS. Se debe tener en cuenta que obtener una mayor producción de biomasa, no significa maximizar la producción en granos (Andrade et al., 2000a).

En el caso de que no existan limitaciones en el suministro de agua ni de nutrientes para el crecimiento del cultivo de soja, la acumulación de MS en el tiempo presenta una primera fase de lento crecimiento, seguida por una etapa de máxima tasa de acumulación, para finalizar cerca de la madurez fisiológica con los valores absolutos más elevados. Al finalizar el ciclo se registra una caída en la acumulación de MS relacionada a la senescencia y a la pérdida de hojas (Andrade, 1993).

La evolución de la MS por área de la soja es muy lenta, en comparación con los demás cultivos de verano, presentando  $18 \pm 0,8 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  (desde el día 40 hasta el 80 después de emergencia), la baja tasa es consecuencia de la baja eficiencia de conversión. Es por esto, que la biomasa acumulada al comienzo de floración representa solo el 9 % del total (Andrade et al., 2000a).

Según proponen Mondino y Gómez (2006), una alta producción de MS en estados vegetativos antes de ingresar en el período reproductivo, ya que el rendimiento es función directa de la producción de biomasa. A su vez Radford (1967), reportó que la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es función lineal de la RS interceptada (Shibles y Weber, 1966), e indica la acumulación de MS por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Radford, 1967).

En estudios realizados por Giménez (2014a), se demostró que el estrés hídrico

durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la TCC en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el NG por m<sup>-2</sup>. En las etapas no críticas (ENC) las deficiencias provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar significativamente el NG.

La acumulación de la MS total por unidad de superficie a lo largo del ciclo de cultivo se incrementó a medida que el espaciamiento entre surcos disminuyó, registrándose los máximos volúmenes de producción en R7 con un promedio de 10500, 11900 y 14600 kg ha<sup>-1</sup> para los distanciamientos entre hileras de 0,70; 0,52 y 0,35 m respectivamente (Mondino y Gómez, 2006).

Según determinó Giménez (2014a), en sus ensayos sin deficiencias hídricas, la acumulación de biomasa en dos años contrastantes, en un año con limitaciones para expresar el potencial de producción de MS, debido al exceso de PP y reducida RS incidente, y al año siguiente con condiciones climáticas preponderantes con menores PP y alta RS incidente, donde para este último año la acumulación de MS fue aproximadamente el doble que el año anterior. Canosa y Prieto (2013) expresan la clara influencia del ambiente sobre la producción de MS. Grasso y Montero (2011) para un año caracterizado como “Niño” que determinó que las PP superaran ampliamente la media histórica y por lo tanto que los niveles de RS estuvieran por debajo de la media histórica de la región, reportaron una baja acumulación de MS. Los tres ensayos comparados fueron realizados en la misma región y con el mismo cultivar por lo que las diferencias obtenidas en la producción de MS dependen exclusivamente de las condiciones ambientales que se presentaron en cada temporada.

En un experimento realizado por Canfalone et al. (2002), se estudió el crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y la RS fotosintéticamente activa se obtuvieron un máximo en los tratamientos bajo riego de 23100 kg ha<sup>-1</sup> de MS y en el tratamiento testigo sin riego la MS fue de 13800 kg ha<sup>-1</sup>.

### 2.5.2. Rendimiento

En el país la soja, se realiza en su amplia mayoría en secano y los rendimientos que se obtienen son menores a los obtenidos por otros países de la región. Sin embargo, los datos experimentales en los que se evaluó el rendimiento de la soja bajo diferentes tratamientos de riego se obtuvo un máximo que varió de 4885 a 7275 kg ha<sup>-1</sup> para las zafas 2009-10 y 2010-11 respectivamente, en cultivos sin deficiencias hídricas (Giménez, 2014a).

Según Salvagiotti (2009), para obtener altos rendimientos, se deben identificar los factores que limitan la producción de los cultivos como primer paso para poder disminuir las brechas de rendimiento entre los rendimientos actuales y los máximos

alcanzables. El rendimiento potencial se logra obtener en ambientes donde no existen limitantes ambientales y se usan genotipos con la mayor adaptabilidad a esos ambientes. De esta manera, cuando se hagan coincidir los periodos de mayor demanda de recursos con la mayor oferta de los mismos y se haya favorecido el desarrollo de un mayor número de destinos reproductivos se obtendrán rendimientos cercanos a los potenciales.

Tal como expresan Kantolic et al. (2003a), en los cultivos para granos, el rendimiento de soja resulta de dos componentes independientes entre sí: NG por unidad de área y el PG. El peso de mil granos (PMG) de soja varía aproximadamente entre 80 y 400g. Las variaciones en el NG provocadas por variaciones ambientales en general están estrechamente asociadas con cambios en el rendimiento.

### 2.5.3. Componentes del rendimiento

El rendimiento en grano puede descomponerse en varios procesos parciales, denominados componentes y subcomponentes numéricos del rendimiento (número de nudos por unidad de superficie, número de frutos por unidad de superficie, número semillas por fruto y el PG promedio). El producto de los dos últimos determinará el PG final a la madurez. Estos componentes y subcomponentes del rendimiento pueden ser modificados por el genotipo, el ambiente y el manejo, afectando el rendimiento final (Bodrero, 2003).

El rendimiento en grano no se relaciona en forma directa con el PMG y sí con el NG por superficie, siendo este último el principal componente del rendimiento en soja (Kantolic y Slafer, 2003c).

#### 2.5.3.1. Número de granos por unidad de área

El NG es el componente más asociado con el rendimiento y más sensible a la influencia del ambiente. Este componente depende de la morfogénesis de estructuras reproductivas (determinante del NG potenciales) y de la fijación de flores fertilizadas. El número de flores en soja excede en gran medida la capacidad potencial para su fijación, aun bajo condiciones ambientales no restrictivas. La fijación de los granos, al contrario, es muy sensible a la disponibilidad de recursos, por lo que el estado fisiológico del cultivo durante el PC es decisivo en la determinación de los niveles de aborto de vainas y granos. No es el número de flores iniciadas, sino el número de las mismas que sobreviven, el principal factor asociado con las variaciones del rendimiento (Baigorri y Martini, 2014).

El NG se determina principalmente durante las fases de R3 a R6 (fijación de vainas) y es función de la TCC durante esta etapa (Andrade y Ferreiro, 1996). Este largo periodo para fijar estructuras reproductivas le permite tener capacidad para compensar

entre componentes de rendimiento (menor número de vainas compensa con aumento del NG por vaina y/o PMG), a medida que la soja progresa hacia nuevas etapas reproductivas, la capacidad de compensación ante situaciones de estrés disminuye y las pérdidas potenciales de rendimiento se incrementan (Baigorri y Martini, 2014).

Tal como indica en sus trabajos Kantolic (2003b), como resultado de estas compensaciones el período R1-R3 no es generalmente crítico para el rendimiento. Las limitaciones posteriores, principalmente durante la etapa R4-R6 tienen un efecto directo sobre el rendimiento, al reducir el NG, sin permitir compensaciones a través de un mayor PMG.

Una adecuada disponibilidad de recursos (RS, temperatura, nutrientes y agua) durante el PC de determinación del rendimiento (R3-R6) garantiza un alto NG. Estas características de la soja hacen que la relación entre el NG sea proporcional a la TCC durante el PC de determinación del rendimiento (Baigorri y Martini, 2014).

En sus estudios Giménez (2014a) demostró, que el estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la TCC en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el NG granos por m<sup>2</sup>. En las ENC las deficiencias provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar significativamente el NG.

#### 2.5.3.2. Peso de granos promedio

El PG final puede describirse como una función entre la tasa de crecimiento y la duración del periodo de llenado de granos. Ambos están gobernados genéticamente y varían de acuerdo a las condiciones ambientales (Kantolic et al., 2003a). La tasa de crecimiento del grano se maximiza cuando la temperatura se encuentra alrededor de los 20 °C y cuando los fotoperíodos son cortos (Kantolic et al., 2003a). Egli y Crafts-Brander (1996), mencionan que la tasa y la duración del llenado de granos son afectadas por la capacidad fotosintética del cultivo. Major et al. (1975), afirmaron que la duración del llenado depende del fotoperíodo y a su vez Egli y Wardlaw (1980) afirmaron que la tasa de llenado es función de la temperatura.

Las principales diferencias entre genotipos en el PG son atribuibles a diferencias en la tasa de crecimiento de los granos. En genotipos con semillas grandes pueden registrarse tasas de 8 a 10 mg semilla<sup>-1</sup> día<sup>-2</sup>, mientras que en genotipos que poseen semillas pequeñas las tasas no superan los 4 mg diarios por semilla (Kantolic et al., 2003a).

El rendimiento de soja está generalmente limitado por la capacidad de la fuente fotosintética a partir de R4, pero es recién a partir de R6-R7 que un estrés afecta

principalmente la acumulación de MS afectando el PG. En esta etapa final del llenado de granos (cuando el NG ya se ha fijado) el estrés hídrico generalmente acorta la duración de esta fase al acelerar la senescencia foliar y la madurez fisiológica reduciendo, por lo tanto el PG y el rendimiento (Baigorri y Martini, 2014).

La disminución del PG causada por deficiencias hídricas están asociadas a un acortamiento en el periodo de llenado que a cambios evidentes en la tasa de crecimiento de los granos (Egli, citado por Kantolic et al., 2003a).

#### 2.5.4. Subcomponentes del rendimiento

Los subcomponentes representan la cantidad de sitios potenciales para el establecimiento de los granos (número de nudos por unidad de área del cultivo), la fertilidad de estos sitios (número de vainas por nudo) y la fertilidad de los frutos (NG por vaina, Kantolic et al., 2003a).

##### 2.5.4.1. Número de nudos

Según Kantolic et al. (2003a), el número de nudos depende del número de plantas emergidas por unidad de área, cuantos nudos aparecen en el tallo principal en cada una de ellas, cuantas ramificaciones poseen y cuantos nudos tienen esas ramificaciones.

El número de nudos que se diferencia en el tallo principal depende principalmente de las condiciones fotoperiódicas previas a la floración (Raper y Kramer, 1987), y de la sensibilidad al fotoperíodo y el hábito de crecimiento del genotipo. El número de nudos que se diferencia en las ramificaciones está asociado con las condiciones fotoperiódicas previas y posteriores a la floración (Board y Settmi, 1986).

Tal como describe Kantolic (2003b), el número de nudos en el tallo principal es muy poco sensible frente a cambios ambientales que provoquen restricciones en la TCC, pero el crecimiento y la supervivencia de los nudos de las ramas se resiente fuertemente ante deficiencias nutricionales e hídricas en post-floración o ante aumentos en la densidad de siembra. La supervivencia de estos nudos esta, condicionada por la TCC y los factores ambientales que la regulan (Board et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

##### 2.5.4.2. Número de vainas por nudo

Según indica Kantolic (2003b), el número de vainas por nudo es variable dentro de la planta y es muy sensible a cambios ambientales que reduzcan el crecimiento del cultivo. Por lo tanto, toda condición ambiental que favorezca el ritmo de fotosíntesis y la TCC conducirá a maximizar el número de vainas por nudo.

El número de vainas por nudo depende de cuantas inflorescencias se desarrollan en cada nudo y cuantas vainas se establecen en cada inflorescencia. El mismo es el resultado de los fenómenos de generación y mortandad de los frutos. La generación incluye la iniciación de primordios florales, su posterior desarrollo y crecimiento hasta su transformación en estructuras florales maduras, la fecundación y el cuaje (Carlson, 1973). El número de vainas que se establecen en cada nudo depende principalmente de la supervivencia de estas estructuras más que del nivel máximo que pueda producirse (Kantolic, 2003b).

La soja, produce muchos más primordios florales de los que puede fijar, cada racimo puede llegar a tener 30 flores, pero menos del 50 % llegan a producir vainas, aun cuando las condiciones ambientales son favorables. Dentro de un nudo, las inflorescencias secundarias y las flores ubicadas en las posiciones distales de los racimos son las más proclives al aborto (Cheftel y Lorient, citados por Kantolic et al., 2003a).

Tal como indican Baigorri y Martini (2014), no es el número de flores iniciadas, sino el número de las mismas que sobreviven, el principal factor asociado con las variaciones del rendimiento. Si bien las causas de mortandad de flores y frutos jóvenes no están del todo claras, las vainas de aparición más tardía tienen menos habilidad para acceder a los carbohidratos necesarios para su supervivencia y crecimiento (Kantolic, 2003b). En caso de que la cantidad de carbohidratos se reduzca por algún tipo de estrés, aumenta la mortandad y disminuye el número final de vainas. La reducción de asimilados también explica que el aborto sea generalmente mayor en las últimas vainas que aparecen en el cultivo (Heitholt et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

La provisión de fotoasimilados no parece ser la única causa que restringe el número de vainas por nudo y es probable que estén involucrados otros mecanismos, que probablemente incluya control hormonal. Debido a la fuerte dependencia del número de vainas por nudo de la TCC, la ocurrencia de deficiencias hídricas o cualquier otro estrés que comprometa la fotosíntesis, reduce el número de vainas por nudo (Kantolic et al., 2003a).

#### 2.5.4.3. Número de granos por vaina

El NG por vaina, tiene alto grado de control genético y, en promedio, resulta poco modificado ante cambios en la disponibilidad de recursos. Una vaina puede contener entre 1 y 4 granos, raramente 5. Algunos genotipos tienen una alta proporción de vainas con tres lóculos fértiles, mientras que en otros predominan las vainas con dos lóculos fértiles (Kantolic et al., 2003a).

Los granos de una vaina pueden abortar antes de ingresar en su fase de llenado

efectivo, modificando el NG logrados por vaina. Sin embargo, el NG por vainas es mucho más estable que los demás subcomponentes ante variaciones ambientales (Board et al., Egli, citados por Kantolic et al., 2003a).

## 2.6. CUANTIFICACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

### 2.6.1. Requerimientos diarios de agua

Según hace referencia Andriani (2002), la soja debe disponer diariamente de agua para satisfacer la demanda atmosférica, es decir, su consumo diario. 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.

Las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la ET que presentan en el ambiente en el que se desarrollan y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva (Pereira y Alves, 2005). La evolución de la ETc está regulada por la demanda atmosférica dada por las condiciones meteorológicas y por los factores que determinan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (DellaMaggiara et al., 2000). El uso máximo diario del agua en el caso de la soja es de aproximadamente 8-9 mm día<sup>-1</sup>, que ocurre cerca de la plena floración hasta el inicio del llenado de las vainas (Wani et al., 2012).

### 2.6.2. Consumo de agua

Tal como expresan Dardanelli et al. (2003), cuando el contenido de AD en el suelo se encuentra por encima de un umbral crítico, el consumo de agua de los cultivos, está determinado por una tasa de transpiración cercana a la que establece la demanda atmosférica y cuando el contenido de AD está por debajo de dicho umbral, la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber el agua del suelo.

El consumo potencial de agua de los cultivos, está determinado básicamente por la energía incidente proveniente de la RS, el período de exposición a la misma y las características del cultivo (Giménez y García Petillo, 2011).

Como indica Andriani (2002), el consumo de agua de los cultivos comprende el agua transpirada por las plantas y la evaporada directamente del suelo, tratándose de la ETc. La cantidad total de agua consumida varía entre años y regiones, estas variaciones dependen de la demanda atmosférica, la duración del ciclo del cultivo y del área foliar que éste desarrolla.

A medida que el ciclo del cultivo es más largo, aumenta la cantidad total de agua consumida. El largo del ciclo de un cultivo de soja variará fundamentalmente con

la fecha de siembra y con la sensibilidad al fotoperíodo del cultivar utilizado. A medida que aumenta el área foliar, aumenta linealmente el consumo de agua del cultivo para una misma demanda atmosférica, hasta alcanzar un cierto valor que produce la cobertura casi total del suelo, después del cual incrementos en el área foliar producen pequeños aumentos en el consumo de agua (Andriani, 2002).

El clima, los suelos, la variedad y las prácticas de manejo determinan la ET de la soja que varía entre 300 mm y 800 mm (Wani et al., 2012). Giménez y García Petillo (2011), indican que la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) estima el consumo de agua de los cultivos que ocurre en las situaciones reales de campo en condiciones de secano. Las ET<sub>c</sub> estimadas presentan variabilidad entre años, destacándose los años “Niña” y “Niño” con los mayores y los menores valores respectivamente. El rango de variación de las ET<sub>c</sub> en las diferentes situaciones agroclimáticas planteadas fue de 455 a 836 mm y las ET<sub>c</sub> promedio variaron entre 463 y 641 mm. Las estimaciones de las ET<sub>r</sub> fueron sustancialmente menores que las ET<sub>c</sub> en la mayoría de las situaciones agroclimáticas planteadas y con una variabilidad entre años superior. Asimismo, se destacan los años “Niña” y “Niño” con los menores y mayores valores de ET<sub>r</sub> respectivamente.

### 2.6.3. Eficiencia del uso de agua

Según definen Dardanelli et al. (2003), la EUA es la biomasa producida por unidad de agua consumida, expresa la eficiencia con la cual un órgano o cultivo fija carbono en relación con el agua que pierde. La EUA varía entre especies, debido al tipo de metabolismo (C3 vs. C4), composición de la biomasa, características del uso de agua y entre climas que condicionan la demanda atmosférica (DellaMaggiora et al., 2000).

El rendimiento en grano depende de la cantidad de agua que el cultivo pueda transpirar, la eficiencia con que se usa el agua para producir MS, y la proporción de la MS que finalmente es destinada a la formación del grano (Toribio, 2008). Se observan menores eficiencias de soja con respecto a otros cultivos de verano, ya que presenta una menor eficiencia fotosintética y además un alto contenido energético del grano (Andrade y Sadras, 2000b).

En los estudios realizados por Vilches y Costanzo (2011), con el rendimiento general del lote y con el consumo medido por la sonda, se calculó la EUA que resultó de 8,8 kg mm<sup>-1</sup>. DellaMaggiora et al. (2000), en Balcarce, obtuvieron una EUA de 9,1 kg mm<sup>-1</sup> mientras que Weir et al., citados por Vilches y Costanzo (2011) en Marcos Juárez, utilizando lisímetros y sin limitantes hídricas, midieron un consumo potencial de 630 mm y una EUA de 6,3 kg mm<sup>-1</sup>.

## 2.7. DEFICIENCIAS HÍDRICAS

Las deficiencias hídricas son una de las principales limitantes ambientales que presenta la soja en el país (Sawchik et al., 2010). Giménez (2014a), señala que las deficiencias hídricas son la principal limitante de los ambientes de producción, las mismas afectan el rendimiento por la disminución en la acumulación de MS y por los efectos negativos en la fijación biológica de nitrógeno.

El estrés hídrico es considerado a nivel mundial como el factor más importante en limitar el crecimiento y el rendimiento de las plantas. En los cultivos de verano realizados en secano, las deficiencias hídricas, se destacan como el factor principal en causar pérdidas en los rendimientos (Boyer, 1982).

La falta de una adecuada distribución de las PP es la responsable de que se produzcan déficit hídrico temporario en distintos momentos del ciclo. 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 consecuencias de las deficiencias hídricas sobre el crecimiento y el rendimiento en grano, dependerán de las etapas de desarrollo en que ocurran (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 de desarrollo del cultivo. Para evaluar este efecto se puede dividir el ciclo del cultivo en tres períodos: 1) Emergencia a floración, en este período las deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50 % de AD) no producen reducciones en el rendimiento. Las intensidades mayores (contenidos entre 20 y el 40 % de AD) podrían producir reducciones del orden del 10 % en el rendimiento. 2) Entre floración y comienzos del llenado de granos, las intensidades medias pueden producir reducciones en el rendimiento del orden del 10 % y deficiencias severas un 20 % o más. 3) Desde comienzos a fin de llenado de granos, es el PC para el cultivo de soja, el estrés produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de semillas por vaina y del PG. Las deficiencias hídricas severas pueden producir pérdidas de rendimiento muy importantes (40 % o más, Andriani, 2002).

Las características morfológicas y fisiológicas de la soja le otorgan capacidad para compensar daños causados por estrés hídrico, la posibilidad de ramificar, la extensa etapa de floración y la producción de un número de estructuras reproductivas superior a las que realmente concreta, son mecanismos que permiten compensar deficiencias hídricas (Andrade y Sadras, 2000b).

La intensidad de la deficiencia va a depender de la disponibilidad del agua

existente en el suelo, capaz de ser explorado por las raíces, y de la capacidad de las mismas para extraerla (Bodrero, 2003). Se ha establecido que sólo el 50 % de la cantidad máxima disponibilidad de agua en el suelo, es fácilmente extractable. El 50 % restante es utilizado por la planta bajo condiciones de estrés hídrico, cada vez más intenso a medida que disminuye su contenido (Andriani, 2002). Sin embargo, para el cultivo de soja en el período reproductivo valores superiores al 50 % han ocasionado restricciones en la producción de MS (Dardanelli et al., 1991).

Los estudios realizados por Giménez (2014a), demuestran que las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4-R6) provocaron disminuciones significativas en los rendimientos de soja, se cuantificaron las pérdidas de grano que variaron entre 44 y 50 %. El estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la TCC en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el NG por m<sup>2</sup>.

## 2.8. RIEGO

Según Allen et al. (2006), se requiere del riego cuando las PP son insuficientes para compensar las pérdidas de agua por ET. El objetivo principal del riego es la aplicación del agua en el momento preciso y con la cantidad precisa de agua. Por medio del cálculo del balance del agua en la zona radicular del suelo, se pueden planificar las láminas y los momentos de aplicación del riego. Para evitar el estrés hídrico se debe aplicar el riego antes, o en el momento, de agotarse la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo.

El clima templado húmedo del país permite la producción agropecuaria de casi todos los rubros en base al aporte natural de agua de las PP. Sin embargo, estas se caracterizan por su extrema irregularidad y variabilidad interanual, tanto en cantidad como en frecuencia. El potencial físico y económico de los sistemas de producción agrícolas y forrajeros es muy dependiente de las PP, marcando así la importancia del riego. El riego ha venido creciendo en forma sostenida en el país en los últimos 40 años: el área total sobre riego en 1970 era de 52 mil hectáreas y en 2010 fue estimada en casi 222 mil, es decir que se cuadruplicó la superficie regada (Faile et al., 2013).

La variabilidad de las PP existentes en el país determina que sea muy común tener respuestas al riego en cultivos agrícolas de verano, período en que la ET supera los aportes de lluvias. A pesar de esto, el riego no se ha extendido masivamente en la agricultura extensiva. Entre las principales causas se pueden encontrar la presencia de años buenos sin necesidad de riego, altos costos de inversión y dificultad en la puesta en práctica de los sistemas de riego (Jiménez de Aréchaga, 2007).

El principal método de riego en el Uruguay es por inundación (arroz) el cual se

ha desarrollado y adaptado a las condiciones edáficas, topográficas, climáticas y de sistemas de producción del Uruguay. No obstante, el avance de la siembra directa como tecnología aplicada en los cultivos de verano, ha hecho que este método de riego haya quedado sin campo de aplicación exceptuando al arroz (Giménez et al., 2014b).

La tecnología de riego por melgas está siendo evaluada, pero presenta mayores dificultades que el método de riego por surcos. Esto se debe a las altas pendientes (mayores al 2 %) de casi todos los campos agrícolas, las bajas a muy bajas velocidades de infiltración dada por la textura muy pesada de estos suelos, y principalmente la poca profundidad del horizonte A, que impide que se realicen los grandes movimientos de tierra de corte y rellenos, que es la práctica habitual en todas las principales zonas de riego del mundo (Giménez et al., 2014b).

### 2.8.1. Manejo de agua de riego

En Uruguay la superficie potencial de riego es de 1.760.000 ha, aplicándose efectivamente al regadío a 210.000 ha, o sea que solo se utilizaba una novena parte del potencial (Aquastat-FAO, citado por Dardanelli et al., 2010).

La tendencia generalizada de disminuir la disponibilidad de agua para la agricultura y los incrementos en los costos de la energía, vuelve cada vez más importante el uso eficiente del agua y de la energía en la agricultura. Estos aspectos condicionan la viabilidad de las actividades de riego en muchas regiones del mundo (López-Mata et al., 2010).

No existe el mejor método de riego, sino que existe un método de riego que es el más apropiado para cada situación particular. El análisis de cada situación debe tomar en consideración aspectos relativos a: i) el suelo, fundamentalmente textura y profundidad, ii) la topografía, grado de la pendiente y microtopografía del terreno, iii) la fuente de agua, caudal o volumen, disponibilidad, calidad y precio, iv) el cultivo, sensibilidad al déficit hídrico, valor de la producción, manejo (en hileras o denso, siembra directa, etc.), v) la mano de obra, disponibilidad, costo, capacitación, vi) la energía, costo y vii) el productor, disponibilidad financiera, idiosincrasia, capacidad de gestión (García Petillo, 2010).

Tal como definen Dardanelli et al. (2010), el umbral de riego (UR), difundido ampliamente como un criterio para aplicar riego suplementario para evitar déficits hídricos no es estático sino función de: i) la profundidad de las raíces, ii) la proporción del agua aplicada que se destina a transpiración iii) la especie y iv) el tipo de suelo. Además, debe tenerse en cuenta la demanda ambiental para la transpiración del cultivo que también influye en el valor del UR.

La uniformidad de aplicación del agua con el sistema de riego condiciona el consumo de agua y energía, así como la producción del cultivo y el posible impacto ambiental del regadío (Louis y Selker, McLean et al., citados por Ortíz et al., 2010).

En general, cuando se aplica un riego, no toda el agua queda almacenada en la zona del suelo explorada por las raíces, sino que parte se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda, siendo muy diferente la cuantía de cada tipo de pérdida según el tipo de suelo y sistema de riego empleado. En consecuencia, la falta de uniformidad puede afectar al rendimiento de la cosecha y la EUA (Warrick y Gardner, Letey et al., Mantovani et al., Li, citados por López-Mata et al., 2010).

La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del AD en su zona radicular. Ésta, está condicionada por: el efecto de los riegos acumulados, la interceptación del agua por parte de la cubierta vegetal y su posterior distribución, la dinámica del agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo (Stern y Bresler, Li y Kawano, Chen et al., citados por Ortíz et al., 2010).

Según indica García Petillo (2012), el cultivo puede extraer solo el AD, es decir el agua comprendida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Pero como ya fue dicho, a medida que el suelo se va secando, al cultivo le cuesta más extraer el agua. Hay un momento en que, a pesar de seguir extrayendo las cantidades no son suficientes para satisfacer la demanda atmosférica y el cultivo sufre estrés, disminuyendo su rendimiento final. A este punto, que separa el contenido de agua en que la extracción se da en confort hídrico del contenido en que la extracción se da con estrés, es conocido como el UR. Este punto también se puede expresar como el porcentaje máximo de agotamiento del AD para no sufrir estrés (p %). La parte del AD entre CC y UR se conoce como agua fácilmente disponible (AFD).

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

### 2.8.2. Respuesta al riego suplementario

El riego suplementario es la tecnología que permite aumentar y estabilizar la producción, existe otra ventaja que es la posibilidad de incorporar producciones alternativas que amplían el espectro de negocios, mejorando la diversidad de cultivos y/o pasturas disminuyendo el efecto detrimental de los monocultivos (Salinas, 2010). Aplicado a cultivos agrícolas y forrajeros puede ser una estrategia poderosa no sólo para atenuar las crisis en años de sequía sino fundamentalmente para estabilizar e incrementar

la producción por unidad de superficie. La elección de la estrategia más adecuada debe realizarse en forma integral de forma de considerar el diseño del sistema de producción, los diferentes escenarios climáticos y de precios (Sawchik et al., 2010).

En su trabajo Bidegain (2012), concluyó, 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. Grasso y Montero (2011), indican que el riego suplementario es una herramienta que reduce las pérdidas de rendimiento ocasionadas por períodos de deficiencias hídricas. Los niveles inferiores al 60 % de AD durante el PC de soja originaron una reducción de  $2.450 \text{ kg ha}^{-1}$  del rendimiento potencial. Las deficiencias hídricas durante el PC provocaron pérdidas de rendimiento del 50 %. El componente que explicó este comportamiento fue el NG por  $\text{m}^{-2}$ . En este trabajo el coeficiente de correlación entre el NG por  $\text{m}^{-2}$  y el rendimiento fue de 0.98.

### 2.8.3. Riego deficitario

El RDC se basa en gestionar los niveles de déficit hídrico que presenta el cultivo a lo largo de su ciclo productivo atendiendo a la sensibilidad de la planta al déficit hídrico (intensidad y duración) en cada una de las fases de su ciclo. La diferencia básica entre el RDC y BH es que con el RDC se propone que la planta esté sujeta a limitaciones de agua en un período determinado y controlado de su ciclo (Girona et al., 2014).

El RD es una estrategia que para su aplicación en la práctica debería integrarse y complementarse con una adecuada tecnología de cultivo que puedan proporcionar todas las ventajas que potencialmente presenta el RDC (Girona et al., 2014). El manejo del riego sirve para manipular la partición de reservas de tal forma que se favorece aquellas partes de la planta que se van a cosechar, no obstante, la aplicación de estas estrategias de riego deben estar siempre bajo la observación y control de los responsables de su puesta en práctica. Es importante controlar la intensidad y duración del déficit hídrico que se aplicara, ya que la respuesta de la planta está condicionada a estos parámetros.

Según aseguran Rosadi et al. (2005), cuando el agua del suelo es igual o mayor al contenido de agua crítico ( $q_c$ ) la  $E_{Tr}$  es igual a la  $E_{Tc}$ , pero si este es menor el coeficiente  $E_{Tr}/E_{Tc} < 1$ , la planta comienza a estresarse. James, citado por Rosadi et al. (2005), menciona que si el suelo se encuentra entre la CC y el  $q_c$ , el rendimiento debe ser mayor al esperado si el contenido de agua del suelo se encuentra entre  $q_c$  y el PMP. En referencia a este aspecto, Rosadi et al. (2005) plantean que el riego completo normalmente se programa para mantener el agua del suelo por encima del  $q_c$ .

$$q_c = CC - p (CC - PMP) \text{ (m}^3\text{m}^{-3}\text{)}$$

Por otra parte, Allen et al. (1998), proponen que se puede calcular la ET ajustada (ETaj) cuando el cultivo está bajo estrés hídrico (contenido de agua del suelo por debajo del qc).

$$ET_{aj} = K_s \times ET_c \qquad (ET_c = ET_o \times K_c)$$

El Ks es el coeficiente de estrés del cultivo y es de suma importancia para la planificación del RD, ya que permite conocer la ETaj (Rosadi et al., 2005).

Tal como proponen Doorenbos y Kassam, citados por Rosadi et al. (2005, 2007) es necesario conocer la relación existente entre la pérdida de rendimiento relativa y el déficit de ET relativa, para conocer el efecto del déficit hídrico. Y lo sintetizan a través de la siguiente ecuación:  $1 - Y_a/Y_c = K_y (1 - ET_{aj}/ET_c)$ , en el cual  $Y_a/Y_c$  es la disminución en el rendimiento relativo,  $K_y$  es el factor de respuesta del rendimiento el cual fue medido y se determinó que para el cultivo de soja es de 0,851 y  $ET_{aj}/ET_c$  es la disminución de la ET relativa.

Según determinaron Rosadi et al. (2005), es de suma importancia tener el conocimiento del qc y del Ks para obtener una mayor EUA; a su vez aseguran que el RD se puede realizar de forma que permita mantener el contenido de agua del suelo por debajo de qc, pero con rendimientos elevados.

Tal como demostraron Candogan et al. (2013), la metodología del cálculo de índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), es adecuado para la programación del riego de soja y su efecto sobre el rendimiento y los componentes. Un programa de riego que considera la escasez de agua podría ser empleado cuando el costo del agua es alto y/o el agua es escasa, con este tipo de estrategia de riego se podrían obtener mayores EUA, además que el CWSI podría utilizarse para evaluar el estrés hídrico de los cultivos y mejorar la programación del riego para soja en condiciones climáticas subhúmedas.

Sincik et al. (2008), realizaron un experimento para investigar la influencia de diferentes niveles de déficit hídrico sobre el rendimiento de soja. Los resultados indican que una mayor cantidad de riego resultó en mayor rendimiento, mientras que la EUA disminuyó cuando aumentó la cantidad de riego.

Nunes et al. (2016), obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento entre los tratamientos con deficiencias hídricas de 50 % y 75 %, en comparación con el tratamiento sin deficiencias hídricas. No se descartaron diferencias cuando el déficit se produjo en la etapa vegetativa, pero si cuando el déficit ocurrió en la etapa reproductiva. Estos autores concluyeron que el manejo de riego con déficit hídrico moderado de 50 %

ET<sub>pc</sub> en la etapa vegetativa, promovió las mejores características agronómicas y contribuyó a incrementar el rendimiento de soja.

En soja, es posible realizar RD con reducciones del 25 % de la lámina de riego y consecuentemente de la E<sub>Tr</sub>, sin mermas significativas en el rendimiento (Prieto et al., 2017). Marković et al. (2015), en sus estudios sobre RD en soja, y riego a capacidad de campo 60-100 % (FWC) durante tres años climáticamente diferentes, concluyeron que esta estrategia puede utilizarse como medida táctica para asegurar la estabilidad del rendimiento y la mejor EUA.

## 2.9. HIPÓTESIS

En el trabajo se determinó la siguiente hipótesis: las estrategias de manejo de RD al 50 % de BH y RDC durante el PC, RDC durante la etapa vegetativa y el PC y RDC desde R1 a R6, permiten un ahorro en el agua de riego y presentan disminuciones del rendimiento de soja inferiores al 20 % del rendimiento logrado con BH durante todo el ciclo.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”, ubicada sobre la ruta 3 Km. 363, Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22' S 58°03' W), durante el año agrícola 2014-15. En el cuadro 1, se presentan las características hidrológicas del suelo del campo experimental según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, es un Brunosol sub-éutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel, incluida dentro de la formación Fray Bentos.

Cuadro 1. Características hidrológicas principales del suelo del campo experimental de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”.

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

Dap: densidad aparente, CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, CAAD: capacidad de almacenaje de agua disponible.

##### 3.1.1. Manejo experimental

El ensayo se sembró el 11 de noviembre de 2014, el cultivar utilizado fue DM 6500 IPRO RR2, con hábito de crecimiento indeterminado. La población objetivo fue de 300.000 pl ha<sup>-1</sup> la que se logró en forma precisa, a través de un ajuste manual de plantas en V2.

En el cuadro 2, se muestra la fecha correspondiente al estado fenológico y los días post-emergencia, durante el ciclo del cultivo. El cultivo se mantuvo libre de malezas, enfermedades y plagas durante todo el ciclo. Para ello se realizaron dos aplicaciones de glifosato con 2 lt ha<sup>-1</sup> de producto comercial para controlar malezas y tres aplicaciones de Lorsban a razón de 1 lt ha<sup>-1</sup> de producto comercial para controlar lagartas foliares (Anticarsia y Rachiplusia).

Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos.

Fecha	Estado fenológico	Días post-emergencia
11/11/2014	Siembra	
21/11/2014	Emergencia	0
22/01/2015	R1	63
04/02/2015	R3	76
13/02/2015	R4	85
15/03/2015	R6	115
31/03/2015	R8	131

En el trabajo se consideró que el PC para la determinación del rendimiento se ubicó entre las etapas R4 y R6 (Fehr y Caviness, 1977).

### 3.1.2. Tratamientos

Los cinco tratamientos evaluados fueron:

- ❖ BH: bienestar hídrico en todo el ciclo (60 % AD o más durante el PC y 40 % de AD o más durante ENC).
- ❖ RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico (60 % AD o más durante el PC y deficiencias hídricas en el resto del ciclo, 20 a 40 % AD).
- ❖ RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y periodo crítico (40 % de AD o más durante PV y 60 % AD o más durante el PC y deficiencias hídricas en el resto del ciclo, 20 a 40 % AD).
- ❖ RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 (40 % de AD o más desde R1 hasta PC y 60 % AD o más durante el PC y deficiencias hídricas en el resto del ciclo, 20 a 40 % AD).
- ❖ RD 50 % BH: riego deficitario todo el ciclo (50 % de la lámina neta aplicada en BH en cada riego realizado).

Los tratamientos mencionados se distribuyeron en 15 unidades experimentales, cada una correspondió a una parcela, las cuales estuvieron constituidas por 5 hileras de cultivo con una distancia entre hileras de 0,4 m y de 5 metros de longitud.

Para lograr los umbrales de AD en el suelo, se realizaron dos tipos de intervenciones: riego suplementario e interceptación de las PP en aquellos tratamientos con deficiencias hídricas planificadas, a través de la utilización de simuladores de sequía

parcelarios y móviles.

Los simuladores fueron construidos en estructuras de acero y cubiertas de lonas impermeables, las dimensiones de los simuladores fueron de 2 metros de ancho, 5 metros de largo y 1,5 metros de altura. Dichas estructuras fueron colocadas en las parcelas que se pretendía interceptar el agua de lluvia, antes de cada evento de PP y retiradas inmediatamente después del evento, de manera de no interferir mayormente con la RS incidente y la temperatura del aire. Además se construyeron rondas y desagües para impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento.

El riego se realizó por un sistema de goteo que permitió agregar agua con precisión en el volumen y en la etapa de desarrollo definida, se utilizaron cintas con goteros cada 0,2 m y un caudal de  $1,47 \text{ lt h}^{-1}$ .

La lámina de riego se definió mediante un balance hídrico de suelos simplificado y de paso diario, de acuerdo a la siguiente fórmula:  $\Delta H = R + PP - ET_c$ , siendo  $\Delta H$  la variación del agua en el suelo en mm; R el riego agregado en mm; PP las precipitaciones en mm y  $ET_c$  la evapotranspiración de cultivo en mm calculada por el método  $ET_c = ET_o \times K_c$ . La  $ET_o$  es la evapotranspiración del cultivo de referencia y  $K_c$  es el coeficiente del cultivo, la  $ET_o$  fue calculada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) y se usaron los  $K_c$  recomendados por la FAO para soja.

### 3.1.3. Precipitaciones efectivas y riego efectivo en las estrategias de riego evaluadas

En el cuadro 3, se presenta el registro de PP efectivas y riego efectivo durante los meses que estuvo presente el cultivo. Se consideró como PP efectiva al volumen de PP en cada evento que ingresó efectivamente en el suelo considerando la situación de AD en cada evento de PP. El riego efectivo fue considerado como el 90 % de la lámina total nominal aplicada en cada riego.

Cuadro 3. Precipitaciones efectivas (mm) y riego efectivo (mm), en las estrategias de riego evaluadas.

<b>PP efectivas</b>	<b>BH</b>	<b>RDC PC</b>	<b>RDC PV-PC</b>	<b>RDC R1-R6</b>	<b>RD 50 % BH</b>
Noviembre	33	33	33	33	33
Diciembre	101	78	99	78	100
Enero	153	34	135	66	172
Febrero	52	56	56	56	56
Marzo	26	46	46	46	46
<b>Total</b>	<b>365</b>	<b>247</b>	<b>369</b>	<b>279</b>	<b>407</b>
<b>Riego efectivo</b>	<b>BH</b>	<b>RDC PC</b>	<b>RDC PV-PC</b>	<b>RDC R1-R6</b>	<b>RD 50 % BH</b>
Noviembre	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0
Enero	22	0	11	0	0
Febrero	121	35	35	63	63
Marzo	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>143</b>	<b>35</b>	<b>46</b>	<b>63</b>	<b>63</b>

BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

## 3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

### 3.2.1. Diseño experimental

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

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión estudiantil 2014. Se realizó análisis de correlación y regresión entre algunas variables, además de análisis de varianza ANAVA.

## 3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

### 3.3.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

A través del balance hídrico de suelos de paso diario se estimó la evolución del AD en cada tratamiento, para que las condiciones hídricas de estos fueran acordes a los objetivos planteados.

En el ciclo del cultivo se realizaron dos muestreos de MS aérea acumulada en los estadios R3 y R6, para ello se cortó 1 metro lineal de plantas en las hileras centrales a ras del suelo, las que fueron colocadas en estufa a 60 °C hasta obtener peso constante. El objetivo fue calcular la evolución de la acumulación de MS aérea y la TCC entre R3-R6.

Las mediciones de MS realizadas en R3 presentaron errores por eso tan solo se presentan las mediciones realizadas en R6.

### 3.3.2. Determinaciones a cosecha

La cosecha se realizó en 9 metros lineales para estimar el rendimiento en grano, el PMG y el porcentaje de humedad en cada tratamiento. Además, se seleccionó un metro lineal de plantas representativas de la hilera central de cada parcela, en que se estimó el principal componente numérico del rendimiento, es decir el NG, asimismo en el tallo principal de cada planta se midió la altura, el número de vainas por planta y NG por vaina.

## 3.4. ANÁLISIS DE DATOS

Las variables relevadas fueron; rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), NG por  $\text{m}^{-2}$ , PMG (g) y producción de MS a R6 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). En las variables mencionadas se llevaron adelante los siguientes análisis estadísticos.

- ❖ Análisis de la varianza
- ❖ Pruebas de comparación múltiple
- ❖ QQ-Plot
- ❖ Levene
- ❖ Análisis de correlación

Los datos fueron analizados a través de un análisis de varianza y se realizó la prueba de Tukey para detectar diferencias entre medias. Se estudió la distribución de los errores por el método gráfico de QQ-plot y se realizó el análisis de Levene para probar la homogeneidad de varianzas. Se utilizó un nivel de significación de 5 % en todas las pruebas y se reportó el p-valor obtenido en cada caso.

## 3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

### 3.5.1. Precipitaciones

En la figura 1, se observan las PP mensuales que se registraron para el período de cultivo y los valores de PP promedio obtenidos en la serie histórica comprendida entre los años 2002 y 2014 para Paysandú. En la figura 1 se puede ver que el período desde noviembre hasta enero 2014-15 las PP registradas fueron superiores al promedio de la serie histórica considerada, siendo en los meses de noviembre y enero más del doble. Sin embargo, en los meses de febrero y marzo éstas fueron menores a la mitad de la serie histórica.

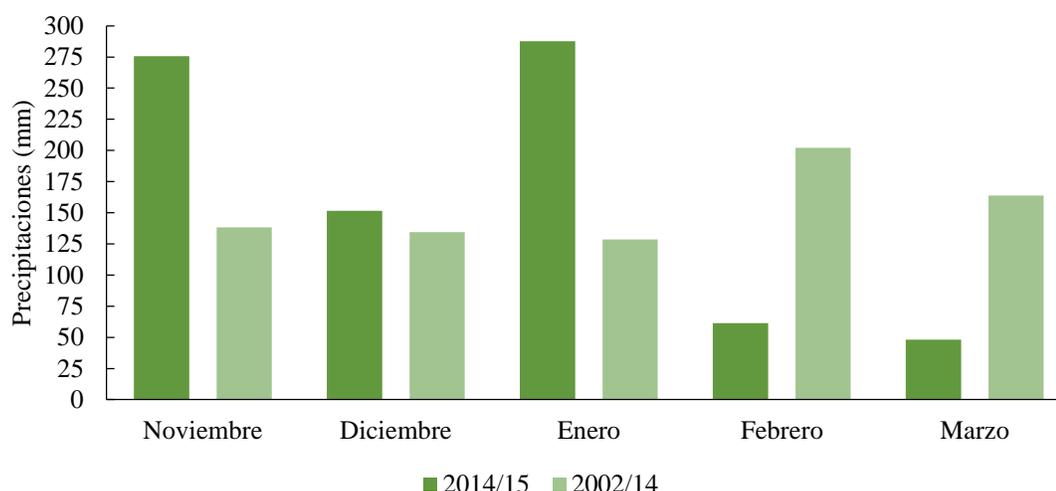


Figura 1. Precipitaciones promedio totales (mm) ocurridas en Paysandú entre los meses de noviembre y marzo para la serie histórica 2002 a 2014 y para el año agrícola 2014-15. Fuente: elaborado en base a datos proporcionados por EEMAC.

En síntesis, no se detectaron grandes diferencias en las PP totales ocurridas durante el año agrícola 2014-15 y la serie histórica 2002-14, pero si hay una diferencia marcada en la distribución de las mismas. En el año agrícola en que se realizó el estudio el 87 % de las PP se concentró entre los meses de noviembre, diciembre y enero, por lo tanto las PP desde noviembre hasta enero, fueron 295 mm superiores, en relación a la serie histórica. En cambio, para los meses de febrero y marzo las PP fueron 256 mm inferiores a las de la serie histórica 2002-14.

### 3.5.2. Radiación solar incidente

En la figura 2, se muestran los datos mensuales de RS diarios promedios incidente, para el período durante el cual se desarrolló el ciclo del cultivo y los valores de RS incidente diaria promedio de la serie histórica 2002-2014. Se puede observar la escasa diferencia en la RS incidente entre el año del estudio 2014-15 y la serie histórica. Sin embargo, para febrero y marzo la RS incidente fue 11 % superior en el año en estudio, en comparación con la serie histórica, esto se manifiesta con las menores PP ocurridas en dicho periodo y la menor proporción de días nublados.

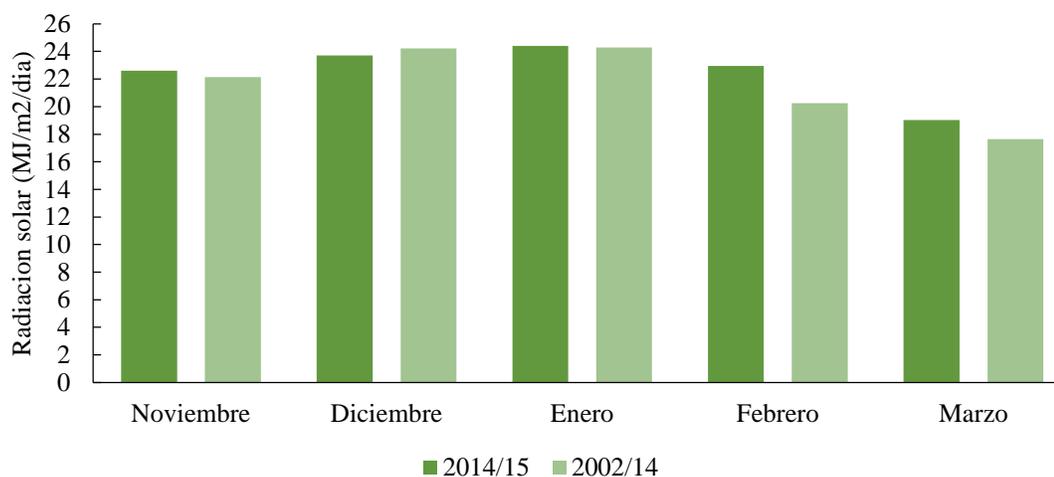


Figura 2. Radiación solar incidente diaria promedio ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ ) ocurrida en Paysandú entre los meses de noviembre y marzo para la serie histórica 2002 a 2014 y para el año agrícola 2014-15.

Fuente: elaborado en base a datos proporcionados por EEMAC.

### 3.5.3. Temperaturas

En la figura 3, se observan las temperaturas medias mensuales que se registraron para el ciclo del cultivo y los valores de temperatura promedio mensuales en la serie histórica 2002-14 para Paysandú. Se observa que las diferencias son menores entre la temperatura promedio para el año en estudio 2014-15 y la serie histórica considerada.

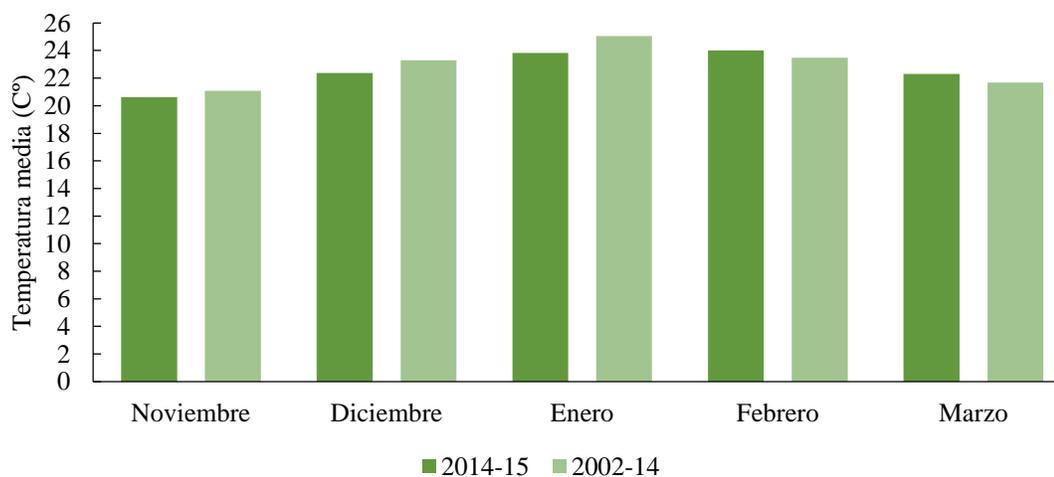


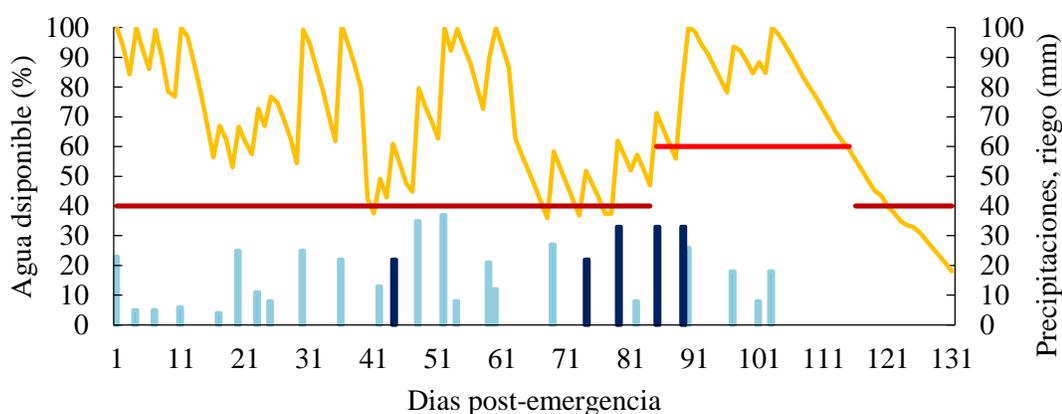
Figura 3. Temperaturas medias ( $^{\circ}\text{C}$ ) ocurridas en Paysandú entre los meses de noviembre y marzo para la serie histórica 2002 a 2014 y para el año agrícola 2014-15.

Fuente: elaborado en base a datos proporcionados por EEMAC.

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

Las figuras siguientes muestran la evolución del porcentaje de AD en los distintos tratamientos, en el perfil de suelo de acuerdo al crecimiento radicular estimado y el agua recibida por riego y por PP efectivas, en cada tratamiento.

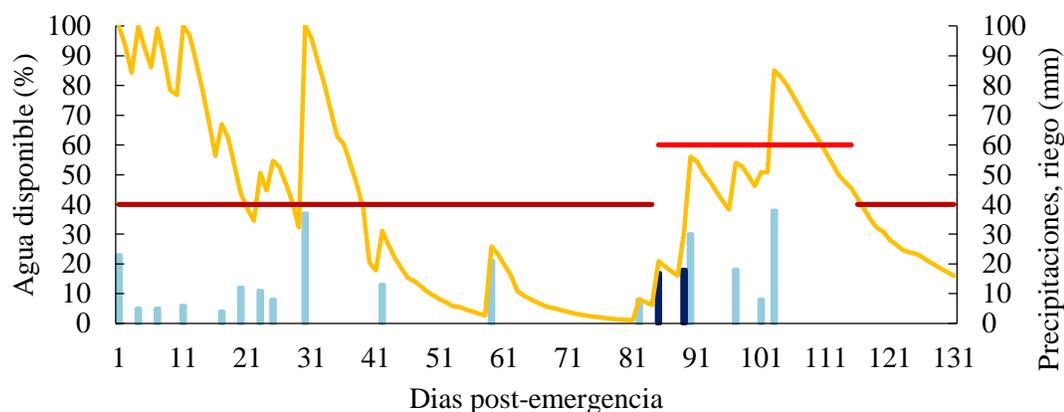
En la figura 4, se observa el porcentaje de AD en el tratamiento con BH, el mismo presentó durante toda la fase vegetativa el porcentaje de AD por encima del umbral determinado, al igual que sucedió en el PC, en la última etapa del ciclo se detectó una disminución del AD, levemente inferior al umbral de 40 %.



Las líneas de color rojo determinan el umbral mínimo considerado de agua disponible (40 %) en las etapas no críticas (ENC) y en el período crítico (PC) (60 %). La línea naranja indica la evolución del agua disponible (%). Las columnas celestes indican las precipitaciones efectivas (mm) y las columnas azules los eventos de riego efectivo (mm).

Figura 4. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento con bienestar hídrico en todo el ciclo.

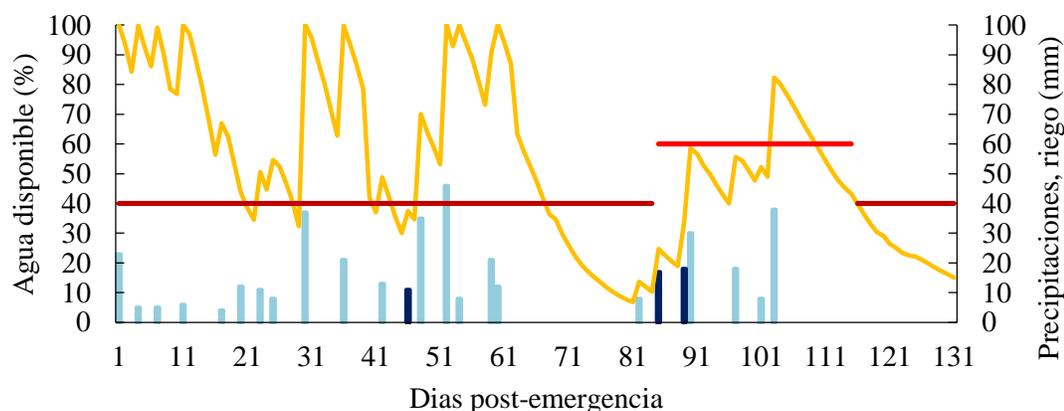
En la figura 5, se muestra la evolución del AD en el tratamiento con RDC en el PC, se constató que las deficiencias hídricas durante una parte de la etapa vegetativa fueron intensas y el AD se situó por debajo del 20 %. En el PC si bien hubo parte de la etapa con valores inferiores al 60 % de AD, las deficiencias hídricas no fueron intensas, ya que el AD se situó por encima de 40 %, sin embargo, en este tratamiento, no se logró totalmente el porcentaje de AD planificado.



Las líneas de color rojo oscuro determinan el umbral mínimo considerado de agua disponible (40 %) en las etapas no críticas (ENC) y en el período crítico (PC) (60 %). La línea naranja indica la evolución del agua disponible (%). Las columnas celestes indican las precipitaciones efectivas (mm) y las columnas azules los eventos de riego efectivo (mm).

Figura 5. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario controlado en periodo crítico y el resto del ciclo deficiencias hídricas.

En la figura 6, se aprecia la evolución del AD en el suelo para el tratamiento de RDC en PV y PC, y se observa que en más del 25 % de los días no se alcanzaron los distintos UR planificados. Se puede observar que al final del período vegetativo (68 días post-emergencia) comenzó el déficit de mayor duración, el cual se extendió por 34 días afectando una parte importante del PC hasta aproximadamente R5.

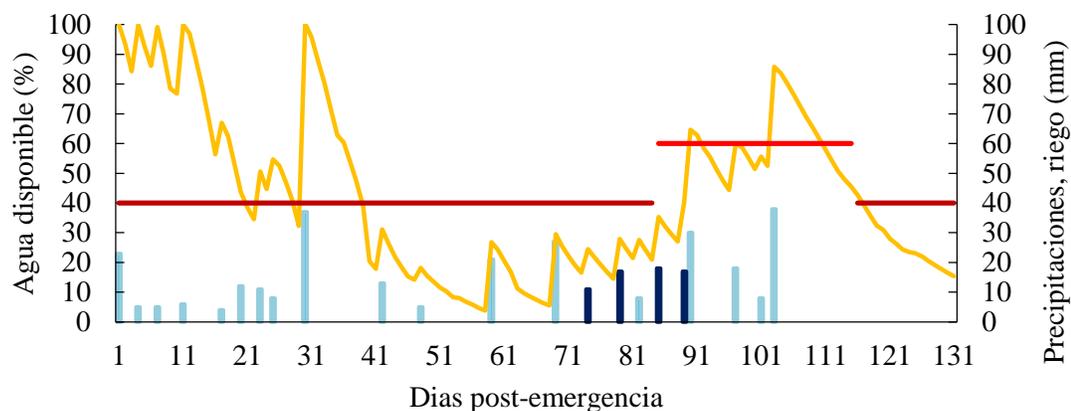


Las líneas de color rojo oscuro determinan el umbral mínimo considerado de agua disponible (40 %) en las etapas no críticas (ENC) y en el período crítico (PC) (60 %). La línea naranja indica la evolución del agua disponible (%). Las columnas celestes indican las precipitaciones efectivas (mm) y las columnas azules los eventos de riego efectivo (mm).

Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario controlado en el periodo vegetativo y el periodo crítico y el resto del ciclo

deficiencias hídricas.

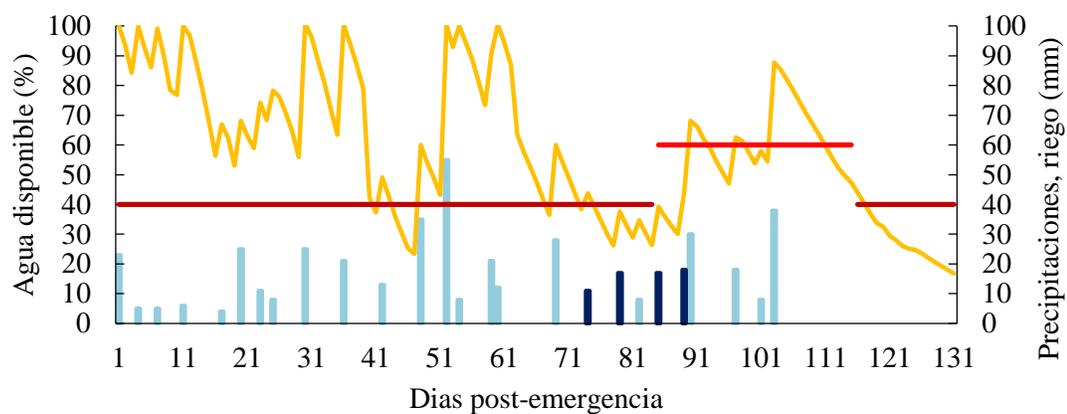
En la figura 7, se presenta la evolución del AD en RDC desde R1 a R6, se aprecia que al igual que en el RDC en PV y PC, se produjeron deficiencias hídricas que afectaron parte del PV y PC. El gráfico demuestra que no se cumplió con los UR planificados para el período comprendido entre R1 a R6.



Las líneas de color rojo oscuro determinan el umbral mínimo considerado de agua disponible (40 %) en las etapas no críticas (ENC) y en el período crítico (PC) (60 %). La línea naranja indica la evolución del agua disponible (%). Las columnas celestes indican las precipitaciones efectivas (mm) y las columnas azules los eventos de riego efectivo (mm).

Figura 7. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario controlado desde R1 a R6 y el resto del ciclo deficiencias hídricas.

En la figura 8, se muestra el AD en el suelo para el tratamiento de RD 50 % BH en todo el ciclo, se observa que los valores de AD fueron similares al tratamiento de BH durante gran parte del ciclo del cultivo, debido a las PP ocurridas ya que en este tratamiento no se interceptaron PP.



Las líneas de color rojo oscuro determinan el umbral mínimo considerado de agua disponible (40 %) en las etapas no críticas (ENC) y en el período crítico (PC) (60 %). La línea naranja indica la evolución del agua disponible (%). Las columnas celestes indican las precipitaciones efectivas (mm) y las columnas azules los eventos de riego efectivo (mm).

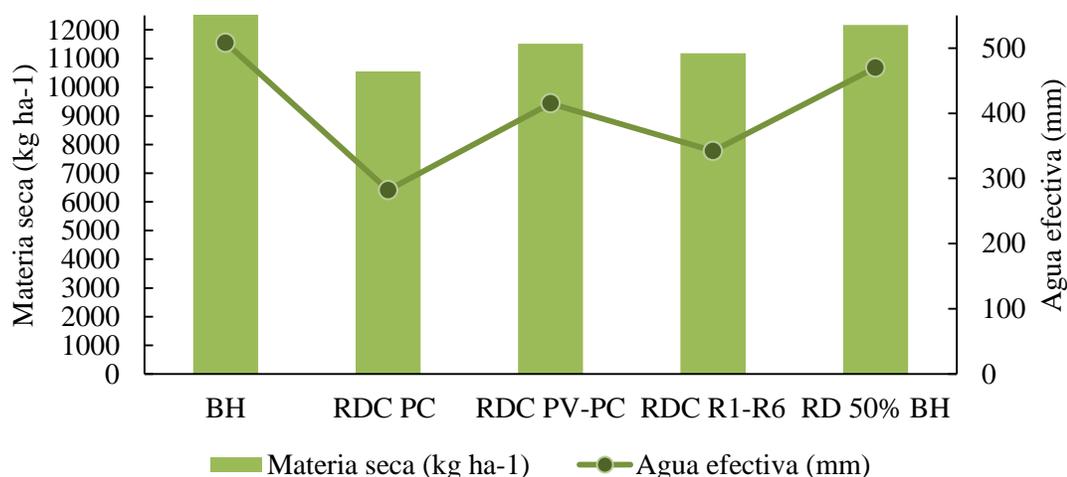
Figura 8. Evolución del porcentaje de agua disponible en el tratamiento de riego deficitario en todo el ciclo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

#### 4.1.1. Materia seca acumulada

La figura 9, muestra la acumulación de MS a R6 y el agua efectiva proveniente de las PP efectivas y el riego efectivo en los tratamientos evaluados. No se detectaron diferencias significativas en la acumulación de MS. Sin embargo, la MS acumulada presentó una tendencia similar al volumen de agua efectiva recibido, es decir los tratamientos con mayor agua efectiva fueron los que mostraron la mayor acumulación de MS. Se puede observar el volumen de agua efectiva que recibieron los tratamientos de BH y RD 50 % BH que fue de 508 y 470 mm, respectivamente y a su vez fueron los que obtuvieron la mayor acumulación de MS a R6. Por otra parte, el RDC en PC, fue el tratamiento que recibió menor volumen de agua es decir 282 mm, coincidiendo con la menor acumulación de MS a R6.



BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

Figura 9. Materia seca total (kg ha<sup>-1</sup>) y agua efectiva (mm), en las estrategias de riego evaluadas.

La acumulación de MS varió entre 10554 y 12633 kg ha<sup>-1</sup>, para los diferentes tratamientos, implicando una diferencia del 16 % entre la mayor y la menor acumulación de MS, mientras que el agua efectiva recibida por los tratamientos evaluados varió entre 282 y 508 mm, significando una diferencia del 44 %. El tratamiento de RDC PC con una reducción de 226 mm en el agua efectiva recibida en todo el ciclo en relación al BH, presentó una pérdida de biomasa aérea de 2079 kg ha<sup>-1</sup>, un 16 % menos que el BH. En

este tratamiento el déficit hídrico ocurrió en las ENC, donde la acumulación de MS es menor como consecuencia de la baja eficiencia de conversión.

En los tratamientos evaluados, la producción de MS fue relativamente elevada para soja debido a que la mayor diferencia en disponibilidad hídrica entre los mismos ocurrió en la etapa vegetativa, donde la deposición de MS es lenta consecuencia de la baja eficiencia de conversión y representa una fracción menor de la biomasa total, según lo reportado por Andrade et al. (2000a). En el tratamiento RDC PC, como ya se indicó durante las primeras semanas (39 días) no se logró provocar deficiencias hídricas y luego de este período presentó deficiencias severas en la etapa vegetativa y en la floración. No se logró aplicar ajustadamente el tratamiento planificado, por lo tanto se interpretó que posiblemente la MS medida en este tratamiento, puede ser mayor a la que se produzca en una estrategia de RDC PC ajustada.

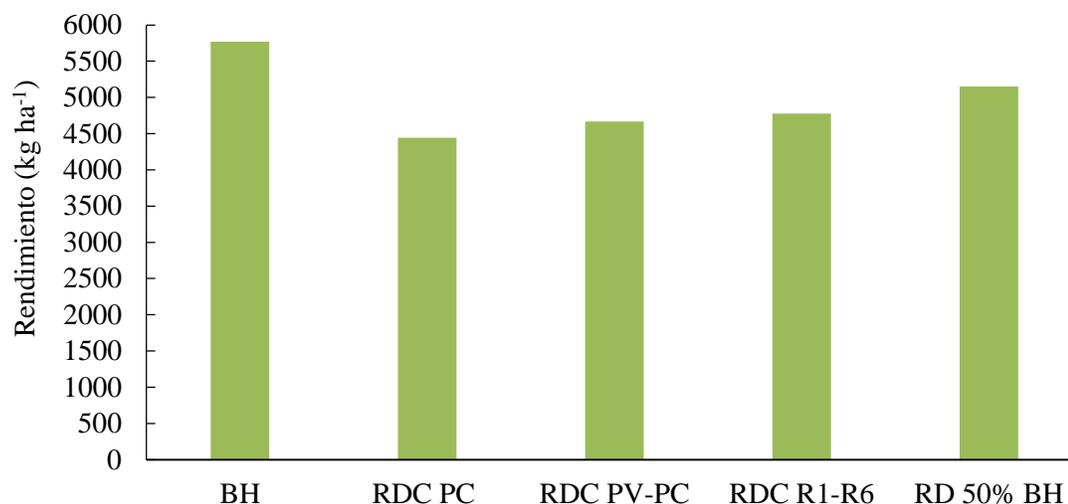
El RDC PV-PC presentó deficiencias hídricas severas en la floración y el RDC R1-R6 en la etapa vegetativa y la floración, a pesar de que en esta última etapa el objetivo era que se encontrara en bienestar hídrico, las deficiencias hídricas acumuladas en la etapa vegetativa no pudieron ser corregidas al comienzo de la floración. Los tratamientos evaluados presentaron riego en el PC, favoreciendo la acumulación de MS total. De manera tal que las diferencias en la acumulación de MS no fueron significativas ya que en esta etapa se produce la mayor TCC según lo reportado por (Andrade, 1993).

Los tratamientos de BH y RD 50 % BH fueron los que presentaron mayor producción de MS en todo el ciclo, siendo la misma de 12633 y 12169 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. En la misma localidad y en condiciones similares Giménez (2014a) logró una mayor producción de MS, ya que obtuvo 16168 kg ha<sup>-1</sup>. En el presente trabajo se interpretó que no se logró esa producción de MS debido a limitaciones de la RS incidente durante el ciclo del cultivo. La RS incidente diaria promedio fue de 22,5 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, siendo 8 % inferior a la que registró Giménez (2014a). En el presente ensayo, las PP durante el periodo vegetativo fueron mayores al promedio histórico (figura 1) y la RS incidente fue menor a la media histórica (figura 2). La mayor nubosidad, afectó negativamente la producción de MS diaria en esta etapa, la cual disminuyó el aprovechamiento de la RS, afectando directamente la producción de biomasa final.

Grasso y Montero (2011), en la misma localidad y en un año caracterizado como “Niño” en el que las PP fueron elevadas y los niveles de RS incidente estuvieron significativamente por debajo de la media, reportaron una acumulación de MS a R6 de 8768 kg ha<sup>-1</sup>. En este ensayo la RS durante el PC llegó a ser 20 % mayor a la que registraron Grasso y Montero (2011), lo cual hizo posible la mayor producción de MS durante la etapa más crítica del cultivo y esto implicó una deposición de MS a R6 superior.

#### 4.1.2. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento

En la figura 10, se observan los rendimientos obtenidos en los tratamientos evaluados, se constató una tendencia a obtener mayor rendimiento con BH en todo el ciclo del cultivo, no obstante, ninguna de las alternativas de riego evaluadas presentó diferencias significativas.



BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

Figura 10. Rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup>), en las estrategias de riego evaluadas.

El rendimiento varió entre 4444 y 5770 kg ha<sup>-1</sup>, para las distintas estrategias de riego, esto se explicó por las diferentes disponibilidades hídricas y las deficiencias hídricas que presentaron los tratamientos de RDC. Con excepción del BH y RD 50 % BH, donde la disponibilidad hídrica dependió de las PP y el riego, los demás tratamientos de RDC presentaron deficiencias hídricas controladas en distintas etapas de desarrollo del cultivo, las que afectaron el rendimiento obtenido, tal como lo expresa Boyer (1982).

Como se indicó anteriormente el mayor rendimiento numérico se logró en el tratamiento de BH. En el mismo sitio en un año “Niña” Giménez (2014a) obtuvo un rendimiento que alcanzó a 7275 kg ha<sup>-1</sup> en el tratamiento de BH. Asimismo, Canosa y Prieto (2013) también en situación de BH reportaron un rendimiento de 6192 kg ha<sup>-1</sup>, en una temporada en la que se registraron niveles de RS superiores a la media durante casi todo el ciclo del cultivo y mayores PP que el promedio durante el PC. Por otra parte, Grasso y Montero (2011), Foster y Rovegno (2015), obtuvieron rendimientos relativamente bajos para BH de 4885 y 4611 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente, en el tratamiento sin deficiencias hídricas, en años donde las PP fueron superiores a la media, lo que

provocó la disminución de la RS afectando así los rendimientos.

Como ya fue explicado en el punto anterior, la diferencia en rendimiento en situación de BH en todo el ciclo, entre los experimentos de sojas realizados, en la misma localidad, se interpretó que fue obtenida por las diferentes condiciones de RS y PP de cada temporada, además de haber utilizado un material genético diferente.

En los tratamientos de RDC PC, RDC PV-PC y RDC R1-R6, el menor rendimiento numérico obtenido con respecto al BH y RD 50 % BH es consecuencia del menor volumen de AD en el suelo y las deficiencias hídricas que presentaron. El déficit hídrico disminuyó la deposición de MS, aumentando la competencia por fotoasimilados, esto derivó en el aborto de estructuras reproductivas, coincidiendo con lo expresado por Andriani (2002). Es por esto, que se interpretó que los rendimientos numéricamente menores en los tratamientos de RDC se explican a partir del volumen de agua efectiva recibido y al déficit hídrico que presentaron en diferentes etapas del ciclo del cultivo.

En el cuadro 4, se presenta el agua efectiva total y por etapas, considerada como la suma del riego efectivo y las PP efectivas, en los tratamientos evaluados.

Cuadro 4. Agua efectiva total recibida (mm) por etapas, en las estrategias de riego evaluadas.

<b>Etapas del ciclo</b>	<b>BH</b>	<b>RDC PC</b>	<b>RDC PV-PC</b>	<b>RDC R1-R6</b>	<b>RD 50 % BH</b>
<b>ENC</b>	372	153	286	213	341
<b>PC</b>	136	129	129	129	129
<b>Total</b>	<b>508</b>	<b>282</b>	<b>415</b>	<b>342</b>	<b>470</b>

ENC: etapa no crítica, PC: periodo crítico, BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

En el cuadro 4, se observa que la mayor diferencia en el volumen de agua recibido entre tratamientos ocurre en las ENC. Los tratamientos de RDC PC, RDC PV-PC, RDC R1-R6 y RD 50 % BH presentaron 41, 77, 57 y 92 % de agua efectiva durante las ENC respectivamente, en comparación al BH. La distribución de agua efectiva en el ciclo del cultivo fue la principal causa en la variación de rendimiento.

En el caso del RDC PC, la pérdida de rendimiento numérica por deficiencias hídricas en las ENC fue de 1300 kg ha<sup>-1</sup>, esto implicó una disminución de 23 % en relación al BH. Al comienzo del ciclo el RDC PC presentó 39 días de bienestar hídrico, luego el agotamiento de AD en el suelo durante la etapa vegetativa y la floración llevó a producir deficiencias hídricas severas (menos de 20 % de AD), provocando que al inicio del PC el riego realizado no fuera capaz de proporcionar el agua necesaria en tan poco

tiempo y se generó una deficiencia hídrica en los primeros días de esta etapa. Por lo que en la parte inicial del PC el AD en el suelo fue inferior al 60 %, esto pudo haber generado una menor disponibilidad de asimilados de los requeridos, el aumento del aborto de estructuras reproductivas y de esa manera una afectación negativa del NG por  $m^{-2}$ .

La diferencia de rendimiento numérica entre el RDC PV-PC y el BH, fue de  $1100 \text{ kg ha}^{-1}$ , implicando una pérdida de 19 %. El déficit hídrico en la floración e inicio del PC con niveles de AD por debajo del umbral, afectó negativamente el rendimiento. El riego realizado en la etapa vegetativa y el PC, no fue capaz de compensar en su totalidad la merma en el rendimiento.

En el tratamiento de RDC R1-R6 el rendimiento numérico fue 17 % inferior al BH, lo que implicó una pérdida de  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$ . Las deficiencias hídricas en la etapa vegetativa condicionaron la disponibilidad hídrica en la floración y fructificación. A pesar de haber recibido riego en la floración, este no fue suficiente para lograr el bienestar hídrico que se pretendía tener en esta etapa, por este motivo se interpretó que se pudo haber subestimado el rendimiento relación con el BH.

El RD 50 % BH mostró la menor diferencia numérica en rendimiento en relación al BH, la misma fue de  $600 \text{ kg ha}^{-1}$ , implicando una pérdida de 11 %. La disponibilidad hídrica fue similar al BH. Las deficiencias hídricas ocurridas en la floración, con una duración aproximada de 14 días y un período corto, de 3 o 4 días con deficiencias hídricas durante el PC (menos de 60 % AD), produjeron una merma de rendimiento de  $600 \text{ kg ha}^{-1}$ . Cabe destacar que los resultados de este tratamiento fueron logrados ya que ocurrieron PP en el período vegetativo que superaron ampliamente la media histórica, y luego en el PC fue regado. A pesar del alto rendimiento, esta alternativa de manejo del riego debe continuar siendo evaluada en diferentes condiciones, por ser muy dependiente de las PP que ocurran en cada temporada.

Entre RDC PV-PC y el RDC R1-R6, el rendimiento mostró una diferencia de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ . Entre las alternativas de RDC estudiadas, se concluyó que estas dos son las más adecuadas, ya que cada una presenta ventajas, relacionadas al manejo del agua.

El RDC PV-PC proporcionó bienestar hídrico durante la etapa vegetativa y permitió armar la estructura de la planta, que luego va a favorecer a la etapa reproductiva coincidiendo con lo reportado por Mondino y Gómez (2006). En el RDC R1-R6 el bienestar hídrico durante el total de la etapa reproductiva permitió concretar en grano una parte significativa de las estructuras reproductivas. A su vez, al ser la etapa de floración más corta que la etapa vegetativa (cuadro 2), el RDC R1-R6 podría disminuir el volumen agua necesario para mantener cada etapa en bienestar hídrico, generando un ahorro económico.

Si bien el RDC PC no presentó diferencias significativas con las restantes estrategias evaluadas, fue la alternativa con menor rendimiento numéricamente y se interpretó que es una estrategia de manejo del agua con riesgos. En temporadas con deficiencias hídricas severas durante la etapa vegetativa y primeras etapas reproductivas (R1 a R3) que implicarían un periodo extenso en el ciclo del cultivo, seguramente con esta estrategia de riego se afectaría de forma significativa el rendimiento, concordando con lo expresado por Andriani (2002), Dardanelli et al. (2003), los cuales afirmaron que las consecuencias de las deficiencias hídricas sobre el rendimiento en grano, dependerán de la intensidad y duración de las mismas.

#### 4.1.3. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes y subcomponentes del rendimiento

En el cuadro 5, se presentan los principales componentes numéricos del rendimiento es decir el NG por  $m^{-2}$  y el PMG (g), no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, existió una tendencia a obtener un mayor NG en el BH con respecto a los demás tratamientos. Luego de analizado los rendimientos obtenidos y al no encontrarse diferencias, el resultado para el NG por  $m^{-2}$  era de esperar, ya que es el principal componente del rendimiento, como lo reportaron Baigorri y Martini (2014).

Cuadro 5. Número de granos por metro cuadrado y peso de mil granos, en las estrategias de riego evaluadas.

Tratamientos	Componentes del rendimiento	
	Número de granos $m^2$	Peso de mil granos (g)
<b>BH</b>	3282	174
<b>RDC PC</b>	2460	179
<b>RDC PV-PC</b>	2531	185
<b>RDC R1-R6</b>	2840	168
<b>RD 50 % BH</b>	2892	178

BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

Las deficiencias hídricas provocadas en los tratamientos RDC PC, RDC PV-PC y RDC R1-R6 ocasionaron disminuciones menores del rendimiento, sin que se generaran diferencias para el componente NG por  $m^{-2}$  con relación al BH. Tomando como referencia el valor de NG por  $m^{-2}$  del BH, las estrategias de RDC PC, RDC PV-PC, RDC R1-R6 y RD 50 % BH obtuvieron el 75, 77, 87 y 88 % respectivamente del NG que obtuvo el BH. Estas cifras demuestran que en ninguna de las estrategias evaluadas se indujo a deficiencias hídricas intensas, ni severas durante el PC.

En la misma localidad, sin deficiencias hídricas Canosa y Prieto (2013), obtuvieron valores similares de NG por  $m^{-2}$  alcanzando 3348, mientras que Giménez

(2014a) en un año “Niña” alcanzó un NG por m<sup>-2</sup> de 4400. Por su parte, Grasso y Montero (2011), Foster y Rovegno (2015), en años “Niño” obtuvieron resultados de NG por m<sup>-2</sup> de 2473 y 2720, respectivamente. La razón que indican estos autores para la obtención de un NG bajo, fue la escasa RS media durante el PC, siendo la misma entre 3 y 4,7 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> menos que la registrada en el presente ensayo afectando de esa manera el principal componente del rendimiento.

En relación al PMG, se apreció que el BH presentó, el valor promedio más bajo entre los tratamientos evaluados, en las estrategias de RDC PC y RDC PV-PC con deficiencias hídricas en la floración, el PMG fue relativamente elevado. En la medida que se analiza el NG se observa una posible compensación parcial entre los componentes numéricos del rendimiento. Son amplios los reportes que coinciden en que el PMG afecta menos el rendimiento que el NG. En este sentido, Andrade et al. (2000a), Kantolic et al. (2003a), Baigorri y Martini (2014), Giménez (2014a), coinciden en que el estrés hídrico durante la etapa final del cultivo, provoca el acortamiento de la fase de llenado, y por ende la disminución del PMG.

En el cuadro 6, se aprecian los subcomponentes del rendimiento analizados es decir NG por planta, vainas por planta, y granos por vaina, para los tratamientos estudiados. El BH mostró el mayor NG por vaina, mientras que el RD 50 % BH a pesar de fijar más vainas por planta, presentó menor número de granos por vaina que el BH. En cuanto a los tratamientos de RDC se observó una compensación en el NG por vaina en relación al RD 50 % BH. En soja, el largo periodo para fijar estructuras reproductivas, la plasticidad de la especie, la partición de MS hacia estructuras reproductivas le permite tener la capacidad para compensar el número de vainas por planta menor con un aumento del NG por vaina, en la medida que no existan deficiencias hídricas, ni nutricionales.

Cuadro 6. Número de granos por planta, número de vainas por planta y número de granos por vaina, en las estrategias de riego evaluadas.

Tratamientos	Subcomponentes del rendimiento		
	No. granos/planta	No. de vainas/planta	No. de granos/vaina
<b>BH</b>	114	56	2,04
<b>RDC PC</b>	85	49	1,74
<b>RDC PV-PC</b>	92	49	1,88
<b>RDC R1-R6</b>	99	51	1,95
<b>RD 50 % BH</b>	101	66	1,50

BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

El RDC PC y el RDC PV-PC presentaron una tendencia de NG por planta menor que el BH. Se interpretó que este comportamiento se debió al aborto y mortandad

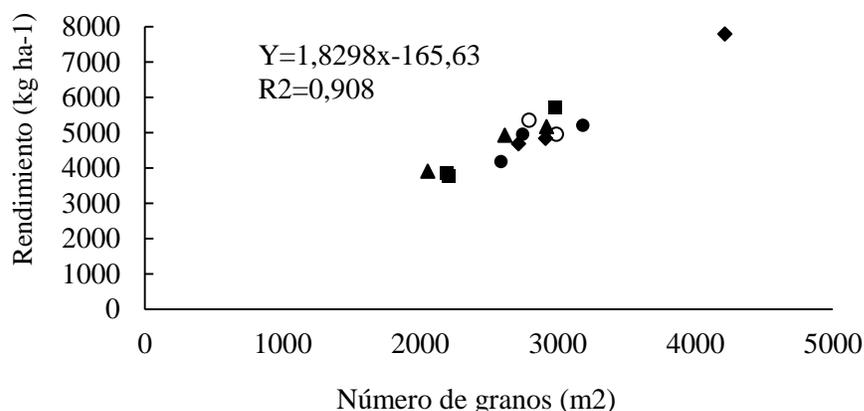
de estructuras reproductivas, consecuencia del estrés hídrico durante las ENC, explicando la disminución en el número de vainas por planta, lo que se tradujo en un menor NG por  $m^{-2}$ , afectando negativamente el rendimiento según indicaron Andrade et al. (2000a).

En la estrategia de riego de RDC R1-R6, con deficiencias hídricas en la etapa vegetativa, la disminución en los subcomponentes del rendimiento fue menor, a la que presentaron las estrategias de RDC PC y RDC PV-PC en relación al BH. El riego realizado en la floración aumentó la supervivencia de estructuras reproductivas, aumentando el NG por planta y por vaina como lo reportaron Baigorri y Martini (2014).

En base a los resultados obtenidos, se concluyó que las deficiencias hídricas menores a 40 % AD en las ENC, provocaron mermas en el NG por  $m^{-2}$  y disminuciones en el rendimiento que variaron entre 600 y 1300  $kg\ ha^{-1}$ , las cuales se interpretaron que se debieron a la menor disponibilidad de asimilados para la fijación de estructuras reproductivas. Esto coincide con lo reportado por Baigorri y Martini (2014), que indicaron que el número de estructuras reproductivas que sobreviven, es el principal factor asociado con la variación en el rendimiento ya que la soja produce más primordios de los que puede fijar.

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

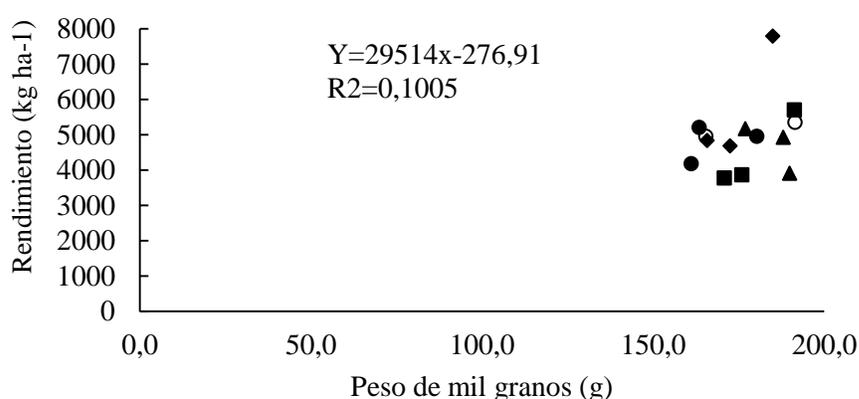
En la figura 11, se muestra la relación que existe entre el rendimiento y el NG por  $m^{-2}$ , mientras que en la figura 12, se observa la relación entre rendimiento y el PMG (g).



BH: bienestar hídrico (◆), RDC PC: riego deficitario controlado en PC (■), RDC PV-PC: riego deficitario controlado en PV y PC (▲), RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 (●) y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico (○).

Figura 11. Relación entre el rendimiento ( $kg\ ha^{-1}$ ) y el número de granos ( $m^2$ ), en las estrategias de riego evaluadas.

El NG por  $m^{-2}$  varió entre 3282 y 2460, para el BH y el RDC PC respectivamente, en los cuales los rendimientos obtenidos fueron de  $5770 \text{ kg ha}^{-1}$  en el BH y  $4444 \text{ kg ha}^{-1}$  en el RDC PC. Una reducción del 26 % en el NG por  $m^{-2}$ , se tradujo en una disminución del 23 % en el rendimiento. En la figura 11, se visualiza una tendencia a obtener mayores rendimientos con un mayor NG por área, existe una alta correlación entre el rendimiento y el NG por  $m^{-2}$ . Se constató nuevamente la importancia del NG por superficie sobre el rendimiento, pudiendo afirmarse que este es el componente numérico más importante que afectó el rendimiento. Tal como reportaron Baigorri y Martini (2014), el NG es el principal componente del rendimiento en soja.



BH: bienestar hídrico (◆), RDC PC: riego deficitario controlado en PC (■), RDC PV-PC: riego deficitario controlado en PV y PC (▲), RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 (●) y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico (○).

Figura 12. Relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y el peso de mil granos (g), en las estrategias de riego evaluadas.

En la figura 12, se observa que el PMG no evoluciona de igual manera que el rendimiento, producir granos más pesados, no siempre significa obtener mayor rendimiento, la relación entre ambas variables resultó muy débil. Estos resultados coinciden con los reportados por Kantolic et al. (2003a), Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013), Foster y Rovegno (2015), los cuales afirman que, si bien el PMG es importante, este componente numérico no presenta la misma tendencia que el rendimiento.

#### 4.1.5. Productividad del agua

La productividad del agua es la relación entre el rendimiento en grano producido con respecto al agua efectiva utilizada. En el cuadro 7, se observa la productividad del agua para los tratamientos evaluados. La mayor productividad del agua obtenida fue  $15,8 \text{ kg mm}^{-1}$ , en el tratamiento de RDC PC, el cual recibió el menor volumen de agua efectivo durante el ciclo del cultivo, mientras que el BH recibió la

mayor disponibilidad hídrica y la productividad del agua fue de  $11,4 \text{ kg mm}^{-1}$ , un 28 % inferior al RDC PC, produciendo menor cantidad de granos por cada unidad de agua efectiva recibida durante el ciclo.

Cuadro 7. Productividad del agua, en las estrategias de riego evaluadas.

Tratamientos	Productividad del agua ( $\text{kg mm}^{-1}$ )
<b>BH</b>	11,4
<b>RDC PC</b>	15,8
<b>RDC PV-PC</b>	11,2
<b>RDC R1-R6</b>	14,0
<b>RD 50 % BH</b>	11,0

BH: bienestar hídrico, RDC PC: riego deficitario controlado en periodo crítico, RDC PV-PC: riego deficitario controlado en período vegetativo y período crítico, RDC R1-R6: riego deficitario controlado desde R1 a R6 y RD 50 % BH: riego deficitario 50 % de bienestar hídrico.

El RDC PC y el RDC R1-R6 fueron las estrategias que presentaron mayor productividad del agua. En el caso del RDC PC se le proporcionó el mayor volumen de agua durante la etapa más sensible al estrés hídrico en la que se determina gran parte el rendimiento y a su vez en el resto del ciclo utilizó un bajo volumen de agua. En el tratamiento RDC R1-R6 el riego se realizó durante la floración (R1-R2), inicio de fructificación (R3) y el PC (R4-R6) suministrando el agua en las etapas de generación y concreción de granos, logrando incrementar el rendimiento y permitiendo aumentar la productividad del agua.

El RDC en estos tratamientos permitió manejar el estrés hídrico de manera que se minimizó la reducción del rendimiento, se disminuyeron las pérdidas y se incrementó el uso más eficiente del agua y un menor volumen total de agua aplicado en comparación al BH, el RDC PV-PC y el RD 50 % BH, permitiendo un ahorro en el agua utilizada. Si bien el RDC PC presentó el menor rendimiento, la disminución en términos relativos, fue menor que la disminución de la  $ET_c$ , lo que contribuyó a obtener la mayor productividad del agua, en comparación con el tratamiento de BH, estos resultados coinciden con los reportados por Fereres y Soriano (2007).

En cuanto a la disponibilidad hídrica de las diferentes estrategias, la diferencia se dio en el volumen de agua de riego efectivo durante todo el ciclo (cuadro 3). El BH consumió 143 mm de agua en el riego efectivo en todo el ciclo, en cambio las estrategias de RDC PC, RDC PV-PC, RDC R1-R6 y RD 50 % BH, consumieron 24, 32, 44 y 44 % respectivamente, del riego efectivo del BH. La diferencia mayor se dio en las ENC, ya que durante el PC donde el aprovechamiento del agua aumenta y la sensibilidad al déficit hídrico es mayor todas las estrategias de riego recibieron el 53 % del volumen de riego efectivo que recibió el tratamiento de BH.

Los resultados muestran que no necesariamente el tratamiento que presenta mayor productividad de agua va a ser el más recomendable para lograr los mayores rendimientos. Se comprobó mediante este ensayo que el tratamiento RDC R1-R6 y RDC PV-PC son una posible alternativa al BH.

Para el caso del RDC PV-PC se considera una alternativa a pesar de su baja productividad de agua, consecuencia de la alta disponibilidad de AD en la etapa vegetativa, debido al gran volumen de PP durante dicha etapa. La etapa vegetativa es más prolongada, la planta se encuentra en pleno crecimiento y formación de hojas, tallos y raíces, en etapas no determinantes para el rendimiento.

En cambio, para el RDC R1-R6 el agua estuvo disponible para el cultivo en las etapas donde el cultivo es sensible al déficit hídrico, permitiendo en las etapas no críticas un déficit hídrico que provocó una reducción menor en rendimiento y una mayor productividad del agua en comparación al BH.

#### 4.1.6. Evapotranspiración del cultivo y eficiencia de uso del agua en bienestar hídrico

En la figura 13, se observa la evolución diaria de la ETc, donde se refleja un claro incremento en la demanda diaria de agua en la etapa reproductiva, esto coincide con lo expuesto por Wani et al. (2012), en que el uso máximo diario del agua en soja, ocurre cerca de la plena floración hasta el inicio del llenado de las vainas.

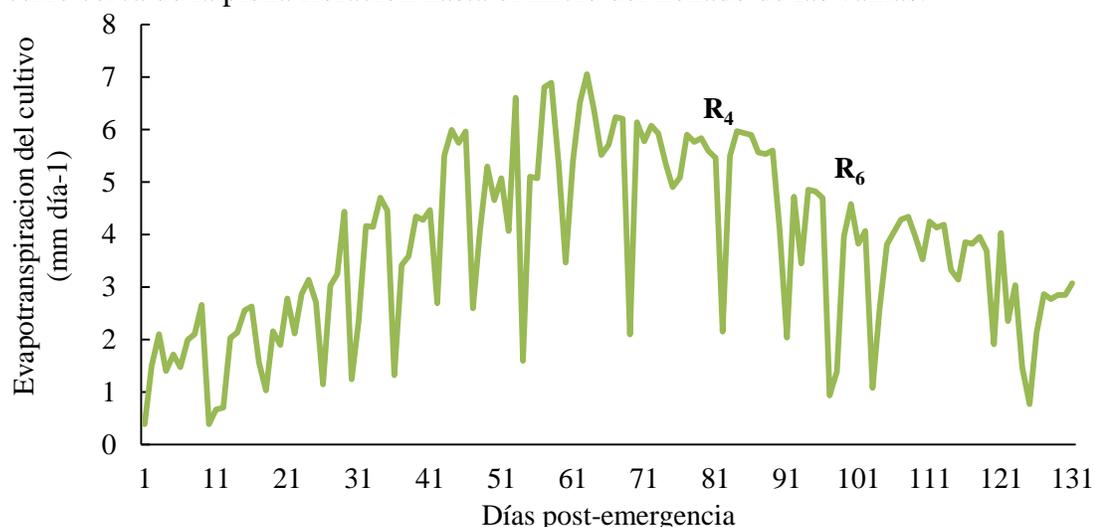


Figura 13. Evolución de la evapotranspiración del cultivo diaria (mm día<sup>-1</sup>) según días post-emergencia, en el tratamiento de bienestar hídrico.

En la figura 13, se aprecia que la ETc comienza a incrementarse a los 20 días post-emergencia, debido a que el cultivo se encuentra en pleno crecimiento, con el aumento del área foliar, crece el consumo de agua del cultivo. Como consecuencia de la

mayor demanda atmosférica de fines de diciembre a principios de enero (25 a 65 días post-emergencia), periodo en el cual la RS es máxima, alcanzándose la mayor ETc diaria entorno a floración con un valor de 7,1 mm día<sup>-1</sup>. La alta variación en la ETc se debe a eventos de PP o días con nubosidad elevada esto explica los cambios abruptos en la evolución de la ETc.

En el cuadro 8, se observan resultados de investigaciones realizadas en la misma localidad. Aunque los datos reportados en los anteriores experimentos no puedan ser comparables totalmente, ya que dependen de las características del año en que se realizaron los ensayos y de las variedades utilizadas. La información muestra una tendencia de asociación positiva entre la ETc y el rendimiento.

Cuadro 8. Resultados comparativos de evapotranspiración del cultivo, rendimiento y eficiencia del uso del agua en el cultivo de soja para la misma localidad.

	<b>ETc total (mm)</b>	<b>Rendimiento (kg ha-1)</b>	<b>EUA (kg mm-1)</b>
<b>Canosa y Prieto (2013)</b>	548	6192	11,3
<b>Giménez (2014)</b>	608	7275	12
<b>Foster y Rovigno (2015)</b>	458	4611	10,1
<b>Ensayo 2014-15</b>	494	5770	11,7

ETc: evapotranspiración del cultivo, EUA: eficiencia del uso del agua.

La ETc promedio obtenida fue de 3,8 mm día<sup>-1</sup> estimándose una demanda total de agua de 494 mm durante el ciclo. En tres experimentos anteriores realizados en la misma localidad, en los que se utilizó otra variedad, los resultados fueron muy variables entre años. En los experimentos realizados en años “Niño” la demanda atmosférica fue menor, ya que son años caracterizados por PP superiores al promedio. Estas diferencias entre ensayos se basan en un gran componente ambiental, teniendo en consideración que se trata de tratamientos con BH por tanto, en ninguno de los casos se presentaron deficiencias hídricas y la ETc dependió exclusivamente de la demanda atmosférica. La RS incidente fue el factor del ambiente que más varió entre los diferentes experimentos mencionados.

En el tratamiento de BH, la EUA fue de 11,7 kg mm<sup>-1</sup>, el rendimiento de soja depende de la cantidad de agua que el cultivo pueda transpirar, la eficiencia con que se usa el agua para producir biomasa y la proporción de biomasa que finalmente es destinada a la formación de grano, tanto el manejo del cultivo, como las condiciones ambientales, fueron las responsables de las diferencias entre los experimentos indicados anteriormente. La EUA como también la ETc son características variables y dependientes de las condiciones climáticas, del manejo del cultivo, de la disponibilidad hídrica y del material genético utilizado.

El incremento de la productividad del agua ( $\text{kg mm}^{-1}$ ), a pesar de lograr menor rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), puede ser una alternativa en situaciones donde el agua es limitante y el costo operativo del riego es elevado. Por tanto, elevar la productividad del agua permitiría reducir costos o por el contrario disponer de mayor volumen de agua y regar una mayor superficie. En cambio, en situaciones donde el agua no es una limitante y el costo del riego significa una proporción menor de los costos totales, apostar a obtener mejores rendimientos, a pesar de lograr una baja productividad del agua sería una opción viable.

Por lo tanto, la estrategia de RDC, es una herramienta que permitiría aumentar los beneficios económicos. No se llegó a la conclusión definitivamente sobre el tema, ya que las características climáticas influyen en los resultados físicos y es necesario evaluar las estrategias en situaciones de deficiencias hídricas mayores, ya sea provocadas o en años con PP menores. El RDC aparece como una estrategia de manejo del agua a continuar profundizando.

## 5. CONCLUSIONES

El trabajo permitió concluir que no existieron diferencias significativas en rendimiento entre los tratamientos evaluados, que incluyeron estrategias de RD y RDC en diferentes etapas y BH en el ciclo del cultivo durante la temporada 2014-15.

El BH como era esperable obtuvo el mayor rendimiento numérico del experimento. Se constataron tres alternativas posibles de continuar su evaluación ellas fueron: RDC PV-PC, RDC R1-R6 y RD 50 % BH. Las alternativas mencionadas presentaron un ahorro de agua de riego efectivo durante el ciclo del cultivo y presentaron rendimientos elevados.

La estrategia de RDC R1-R6 mostró una mayor partición de asimilados hacia los granos y el período de riego fue más corto con respecto a RDC PV-PC. No obstante, en RDC PV-PC el bienestar hídrico en la etapa vegetativa, permitió captar más recursos y producir una mayor acumulación de MS, aunque la misma no fue significativa en comparación con RDC R1-R6. Además, RDC PV-PC permitió un ahorro del agua de riego con respecto a la estrategia de RDC R1-R6.

El RD 50 % BH, presentó una condición de disponibilidad hídrica asociada a las PP que ocurrieron durante el ciclo, por ese motivo, el rendimiento puede llegar a presentar elevada variabilidad entre años, a su vez la dependencia de las PP no asegura que el cultivo se encuentre en bienestar hídrico durante el PC, etapa en la que se determina gran parte del rendimiento.

El RDC PC presentó potencialmente un amplio período del ciclo del cultivo con posibles deficiencias hídricas entre VE y R3, el bienestar hídrico durante el PC, no asegura rendimientos elevados en años con deficiencias hídricas intensas durante la etapa vegetativa y parte de la floración ya que las estructuras reproductivas van a ser limitantes.

Las características del año y principalmente el volumen y distribución de las PP ocurridas durante la etapa vegetativa, generó que para las estrategias de RDC PC y RD 50 % BH, se obtuvieran rendimientos elevados sin diferencias significativas con el tratamiento de BH. Por estos motivos sería prudente evaluar estas estrategias en situaciones hídricas de mayor restricción.

## 6. RESUMEN

El experimento se realizó durante el verano 2014-15, en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”, perteneciente a la Facultad de Agronomía en el departamento de Paysandú, Uruguay. Con el fin de evaluar la respuesta productiva de soja a diferentes estrategias de riego deficitario controlado (RDC), se cuantificaron el rendimiento, sus principales componentes y la acumulación materia seca (MS) al final del ciclo del cultivo. Se realizaron cinco tratamientos en donde, el testigo fue el bienestar hídrico (BH) durante todo el ciclo del cultivo. Los demás tratamientos fueron RDC en período crítico y deficiencias hídricas en el resto del ciclo (RDC PC), RDC en período vegetativo y período crítico con deficiencias hídricas en el resto del ciclo (RDC PV-PC), RDC desde R1 a R6 y deficiencias hídricas en el resto del ciclo (RDC R1-R6) y riego deficitario todo el ciclo (RD 50 % BH). Las deficiencias hídricas se generaron por intercepción de las precipitaciones (PP) a través del uso de simuladores de sequía y el bienestar hídrico se logró con riego suplementario. En cada tratamiento se planteó la fertilización, manejo de malezas y plagas de la misma manera con el fin de poder eliminar ese desbalance y poder ver su influencia en el rendimiento. Existe una tendencia a obtener mayores rendimientos, con mayores disponibilidades hídricas. El rendimiento en soja vario entre 5700 y 4444 kg ha<sup>-1</sup>, donde el BH en todo el ciclo tuvo el mayor rendimiento, las deficiencias hídricas en el tratamiento de RDC PC provocaron reducciones en el rendimiento de 23 %, mientras que deficiencias hídricas en el RDC PV-PC redujeron el rendimiento en un 19 %, el tratamiento con RDC R1-R6 presentó una disminución del rendimiento del 17 %, por último el RD durante todo el ciclo presento una disminución en el rendimiento del 11 %. En número de grano (NG) por m<sup>-2</sup> y el peso de mil granos (PMG) no se encontraron diferencias significativas. La acumulación de MS a fin de ciclo vario entre 12633 y 10554 kg ha<sup>-1</sup> presentando una tendencia similar al volumen de agua efectiva recibido por los tratamientos, siendo el BH el que presento la máxima acumulación de MS. La productividad del agua (kg mm<sup>-1</sup>) y la eficiencia del uso del agua (EUA) aumento en los tratamientos con RDC, donde la disminución en el rendimiento en términos relativos fue menor a la disminución en la evapotranspiración del cultivo (ETc), en relación al tratamiento de BH. Los resultados mencionados fueron obtenidos en un año el cual no presento grandes diferencias a las serie histórica, siendo muy similares en radiación solar (RS) y temperatura, durante todo el ciclo, aunque para las PP si bien en el volumen total fueron similares a la serie histórica, no así la distribución en la que se registraron en cada mes, siendo un 78 % mayor durante el periodo vegetativo y un 70 % inferior durante el PC para el año en que se realizó el ensayo.

Palabras clave: *Glycine max*; Riego deficitario controlado; Productividad del agua; Rendimiento.

## 7. SUMMARY

The experiment was realized out during the 2014-15 summer at the "Dr. Mario A. Cassinoni" belonging to the Faculty of Agronomy in the department of Paysandú, Uruguay. To evaluate the productive response of soybean to different strategies of regulated deficit irrigation (RDI) the yield its main components and the accumulation of dry matter (DM) at the end of the crop cycle were quantified. Five treatments were carried out in which the control was the hydrological well-being (HW) throughout the crop cycle. The other treatments were RDI in critical period and water deficiencies in the rest of the cycle (RDI CP) RDI in vegetative period and critical period with water deficiencies in the rest of the cycle (RDI VP-CP) RDI from R1 to R6 and deficiencies water in the rest of the cycle (RDI R1-R6) and deficit irrigation throughout the cycle (DI 50 % HW). Water deficiencies were generated by interception of rainfall (PP) through the use of drought simulators and water wellbeing was achieved with supplementary irrigation. In each treatment fertilization weed and pest management were considered in the same way in order to eliminate this imbalance and see its influence on performance. There is a tendency to obtain higher yields with greater water availability. The yield in soybean varied between 5700 and 4444 kg ha<sup>-1</sup> where the HW throughout the cycle had the highest yield water deficiencies in the treatment of RDI CP caused yield reductions of 23 %, while water deficiencies in the RDI VP-CP reduced the yield by 19 %, the treatment with RDI R1-R6 showed a decrease of the yield of 17 %, finally the DI during the whole cycle showed a decrease in the yield of 11 %. In number of grain per m<sup>-2</sup> and the weight of one thousand grains no significant differences were found. The accumulation of DM at the end of the cycle varied between 12633 and 10554 kg ha<sup>-1</sup>, presenting a similar trend to the volume of effective water received by the treatments, with HW presenting the highest accumulation of DM. Water productivity (kg mm<sup>-1</sup>) and water use efficiency increased in RDI treatments where the decrease in yield in relative terms was less than the decrease in crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) relation to the treatment of HW. The aforementioned results were obtained in a year which did not present great differences to the historical series being very similar in solar radiation and temperature during the whole cycle although for the PP although in the total volume they were similar to the historical series but not the distribution in which they were recorded in each month being 78 % higher during the vegetative period and 70 % lower during the CP for the year in which the test was conducted.

Keywords: *Glycine max*; Deficit irrigation controlled; Water productivity; Performance.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma, FAO. s.p. (Estudio de Riego y Drenaje no. 56).
2. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 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).
3. Andrade, F. H. 1993. Crecimiento y rendimiento comparado de maíz girasol y soja. INTA Balcarce. Boletín técnico no. 114. 27 p.
4. \_\_\_\_\_.; Ferreiro M. 1996. Reproductive growth of mize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. Field Crops Research. 48: 155-165.
5. \_\_\_\_\_.; 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.
6. \_\_\_\_\_.; 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.
7. Andriani, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. IDIA XXI. 2 (3): 48-51.
8. Arbeletche, P.; Carballo, C. 2009. La expansión agrícola en Uruguay: algunas de sus principales consecuencias. Revista de Desarrollo Rural y Cooperativismo Agrario. 12: 7 - 20.
9. Baigorri, H. 1997. Elección de cultivares. In: Giorda, L.; Baigorri, H. E. eds. El cultivo de la soja en Argentina. Córdoba, Argentina, INTA. pp. 102-105.
10. \_\_\_\_\_. 2000. Notas del traductor; cómo se desarrolla una planta de soja. Marcos Juárez, Argentina, INTA. 10 p.
11. \_\_\_\_\_.; Croatto, D. R. 2002. Manejo del cultivo de soja en Argentina. Marcos Juárez, Argentina, INTA. 12 p.

12. \_\_\_\_\_.; Martini, E. 2014. Determinantes del rendimiento. (en línea). In: Soja: manual de tecnologías. s.l., Syngenta. s.p. Consultado 15 mar. 2016.  
Disponible en  
[http://www.syngentaenvivo.com.ar/2014/manual/files/soja\\_determinantes\\_del\\_rendimiento.htm](http://www.syngentaenvivo.com.ar/2014/manual/files/soja_determinantes_del_rendimiento.htm)
13. 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. 28 p.
14. Blum, A.; Narbondo, I.; Oyhantcabal.; Sancho, D. 2008. Soja transgénica y sus impactos en Uruguay: la nueva colonización. Montevideo, Uruguay, s.e 194 p.
15. Board, J. E.; Settimi, J. R. 1986. Photoperiod effect before and after flowering on branch development in determinate soybean. *Agronomy Journal*. 78: 995-1002.
16. Bodrero, M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. In: Jornada Nacional de Soja (2003, Soriano, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 1-12 (Actividades de Difusión no. 325).
17. Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. *Science*. 218: 443 - 448.
18. Burman, R. D.; Cuenca, R. H.; Weiss, A. 1983. Techniques for estimating irrigation water requirements. In: Hillel, D. ed. Advances in irrigation. London, Academic Press. v. 2, pp. 336-391.
19. Candogan, B. N.; Sincik, M.; Buyukcangaz, H.; Demirtas, C.; Goksoy, A. T.; Yazgan, S. 2013. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. *Agricultural Water Management*. 118: 113–121.
20. Canfalone, A.; Villacampa, Y.; Cortés, M.; Navarro, M. 2002. Crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa. (en línea). *Revista Brasileira de Agrociência*. 8 (3): 185-189. Consultado 14 mar. 2016. Disponible en  
<http://www2.ufpel.edu.br/faem/agrociencia/v8n3/artigo02.pdf>

21. 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. 59 p.
22. Capurro, M.; Beretta, A.; García, C.; Sawchik, J.; Puppo, L. 2017. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia* (Montevideo). 21(1):65-76.
23. Carlson, J. B. 1973. Morphology. In: Caldwell, B. E. ed. Soybeans: improvement, production and uses. Madison, WI, ASA/CSSA/SSA. pp. 17-95 (Agronomy Monograph no. 16).
24. Castaño, J. P.; Ceroni, M.; Giménez, A.; Furest, J.; Aunchayna, R.; Bidegain, M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 193). Consultado 11 mar. 2016. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
25. Dardanelli, J.; Suero, E.; Andrade, F. H.; Andriani, J. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybean II Water use and water deficiency indicators. *Agronomie*. 11:747-756.
26. \_\_\_\_\_; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo de agua en los sistemas de producciones de los cultivos de grano. 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, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 375-440.
27. \_\_\_\_\_; Severina, I.; Andriani, J. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: su rol en la optimización del riego suplementario. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 19-28.
28. 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, EEA INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.
29. De Melo V.; Melgar, R.; Vitti, G. 2011. Soja en Latinoamérica: fertilizando para altos rendimientos. Buenos Aires, Argentina, Agroeditorial. 180 p.

30. Durán, A.; Califra, A.; Molfino, J. H. 1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. (en línea). Montevideo, MGAP. 14 p. Consultado 13 mar. 2016. Disponible en [http://cebra.com.uy/renare/media/Suelos\\_del\\_Uruguay\\_segun\\_Soil\\_Taxonomy.PDF](http://cebra.com.uy/renare/media/Suelos_del_Uruguay_segun_Soil_Taxonomy.PDF)
31. Egli, D. B.; Wardlaw, I. F. 1980. Temperature response of seed growth characteristics of soybean. *Agronomy Journal*. 72(3): 560-569.
32. \_\_\_\_\_; Crafts-Brander, S. J. 1996. Soybean. *In*: Zamski, E.; Schaffer, A. eds. Photoassimilate distribution in plants and crops: source-sink relationships. New York, Marcel Dekker. pp. 595-623.
33. Faile, A.; Peixoto, C.; Estol, E.; Preve, A.; 2013. Estudio sobre riego agropecuario en Uruguay. (en línea). Anuario OPYPA 2013: 449-465. Consultado 15 mar. 2016. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/opypapublicaciones/ANUARIOS/Anuario2013/material/pdf/25.pdf>
34. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2003. Porqué la productividad del agua es importante para el desafío global del agua. (en línea). *In*: Foro Mundial del Agua (3º., 2003, Kyoto). Descubrir el potencial del agua para la agricultura. Roma. pp. 23-25. Consultado 9 abr. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/Y4525S/y4525s00.htm#Contents>
35. Farias, J. R.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. Ecofisiología da soja. (en línea). EMBRAPA. Circular Técnica no. 48. pp. 1-9. Consultado 13 nov. 2017. Disponible en <https://www.embrapa.br/soja/busca-de-publicacoes/-/publicacao/470308/ecofisiologia-da-soja>
36. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. pp. 929-931.
37. Fereres, E.; Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58 (2):147–159.
38. 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. 60 p.

39. García Petillo, M. 2010. ¿Por qué no regar por gravedad? In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 67-72.
40. \_\_\_\_\_. 2012. Conceptos básicos para el diseño y el manejo del riego. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 25-32.
41. Gardner, B. R.; Pearce, R. B.; Mitchel, R. L. 1985. Physiology of crops plants. Ames, Iowa State University. 327 p.
42. Gaso, D.; Núñez, A. 2015. Herramientas para el manejo del cultivo de soja. (en línea). Revista INIA. no. 42: 13-18. Consultado 22 mar. 2018. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5008/1/revista-INIA-42.p.13-18-GASO-NUNEZ.pdf>
43. Giménez, L.; García, M. 2009. Estudio de las necesidades hídricas de los cultivos de verano en Uruguay. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º., 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 17-31.
44. \_\_\_\_\_.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrocienca (Montevideo). 15(2): 100-108.
45. \_\_\_\_\_. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?. In: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 33-41.
46. \_\_\_\_\_. 2014a. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. Agrocienca (Montevideo). 18 (1): 53-64.
47. \_\_\_\_\_.; García Petillo, M.; Boggiano, P.; Piedrabuena, L. 2014b. Riego suplementario en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. 66 p. (Serie Técnica no. 55).

48. Girona, J.; Bonastre, N.; Marsal, J. 2014. Estrategias de gestión de riego eficiente y sostenible: riego deficitario controlado o una oportunidad inteligente en el uso de recursos naturales. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (3°. 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 79-94.
49. 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. 46 p.
50. Jiménez de Aréchaga, P. 2007. El riego es necesario a pesar de las abundantes lluvias. *Revista Uruguay Ciencia*. no. 3: 9- 12.
51. Kantolic, 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, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
52. \_\_\_\_\_. 2003b. Ecofisiología del cultivo de soja: bases para el manejo y para el aumento del rendimiento potencial. In: Reunión de Actualización en Soja (2°. 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.
53. \_\_\_\_\_.; Slafer, G. 2003c. Número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperiodo 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, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 186 - 187
54. Karam, R. M.; Sfeir, F.; Mounzer, O.; Roupael, Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 75: 226-244.
55. López-Mata, E.; Tarjuelo, J. M.; De Juan, J. A.; Ballesteros, R.; Domínguez, A. 2010. Efecto de la uniformidad de riego en el rendimiento económico de un cultivo. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1°. 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 91-101.

56. Major, D. J.; Johnson, D. R.; Tanner, J. W. Y; Anderson, I. C. 1975. Effects of daylength and temperature on soybean development. *Crop Science*. 15: 174-179.
57. Marković, M.; Josipović, M.; Ravlić, M.; Josipović, A.; Zebec, V. 2015. Deficit irrigation of soybean (*Glycine max.* (l.) merr.) based on monitoring of soil moisture, in sub-humid area of eastern Croatia. *Romanian Agricultural Research*. no. 33: 259-266.
58. Melgar, R.; Vitti, G.; Melo Benitez, V. 2011. Soja en Latinoamérica. Instituto Internacional de la Potasa. Boletín no. 20: 25-48.
59. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigación Estadística Agropecuarias, UY). 2015. Encuesta agrícola “invierno 2015”. (en línea). Montevideo. 19 p. Consultado 13 nov. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta\\_agricola\\_invierno\\_2015.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_invierno_2015.pdf)
60. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2016. Resultados de la encuesta agrícola “primavera 2015”. (en línea). Montevideo. 16 p. Consultado 13 nov. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta\\_agricola\\_primavera\\_2015.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_primavera_2015.pdf)
61. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2017. Encuesta agrícola “invierno 2017”. (en línea). Montevideo. 19 p. Consultado 06 mar. 2018. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/enc\\_agricola\\_inv2017.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/enc_agricola_inv2017.pdf)
62. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2018. Resultados de la encuesta agrícola “invierno 2018”. (en línea). Montevideo. 5 p. Consultado 19 sep. 2018. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/comunicado\\_prensa\\_inv\\_2018\\_vf\\_002.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/comunicado_prensa_inv_2018_vf_002.pdf)
63. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay: segunda aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección de Recursos Naturales Renovables. 12 p. Consultado 13 mar. 2016. Disponible en [http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/rec\\_nat/agua\\_disp\\_uru.pdf](http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/rec_nat/agua_disp_uru.pdf)

64. Mondino, M.; Gómez, D. 2006. Evolución de la intercepción de la radiación incidente y la producción de biomasa en soja de siembras extra tempranas a diferentes espaciamientos. Entre Ríos, Argentina, Universidad Nacional de Entre Ríos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Sección Ecofisiología y Climatología. pp. 83-86.
65. Nunes, C. A.; Bezerra, F. M. L.; Silva, R. A.; Da Silva Junior, J. L. C.; Goncalves, F. B.; Santos, G. A. 2016. Agronomic aspects of soybean plants subjected to deficit irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*. 20 (7): 654-659.
66. Ortiz, J. N.; De Juan, J. A.; Tarjuelo, J. M. 2010. Riego mecanizado: ensayos de uniformidad y eficiencia de los diferentes tipos de emisores. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 49-66.
67. Pereira, L. S.; Alves, I. 2005. Crop water requirements. In: Hillel, D. ed. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. London, Elsevier. v.1, pp. 322 - 334.
68. Prieto, S.; Prieto, D. R.; Angella, G. A. 2017. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. (en línea). Santiago del Estero, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Agronomía y Agroindustrias 10 p. Consultado 17 ago. 2017. Disponible en [http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-evaluacion\\_de\\_diferentes\\_estrategias\\_de\\_riego\\_deficitario\\_controlado\\_e\\_n\\_el\\_cultivo\\_de\\_soja.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-evaluacion_de_diferentes_estrategias_de_riego_deficitario_controlado_e_n_el_cultivo_de_soja.pdf)
69. Radford, P. J. 1967. Growth analysis formulae-their use and abuse. *Crop Science*. 7(3): 171-175.
70. Raper, C. D.; Kramer, P. J. 1987. Stress physiology. In: Wilcox, J. R. ed. *Soybeans: improvement, production and uses*. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, WI, American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science Society of America. pp. 589-641.
71. Ritchie, S. W.; Hanway, J.; Thompson, H.; Benson, G. 1994. How a soybean plant develops. Ames, IA, Iowa State University. Cooperative Extension Service. 20 p. (Special Report no. 53).

72. 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.
73. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2007. The effect of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (*Glycine max* [L.] Merr.). *Paddy Water Environment*. 5: 163-169.
74. Saavedra, C. 2011. Un siglo de agricultura. (en línea). *Revista del Plan Agropecuario*. no. 137: 46-49. Consultado 16 jul. 2018. Disponible en [http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R137/R\\_137\\_46.pdf](http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R137/R_137_46.pdf)
75. Sadras, V. O.; Ferreiro, M.; Gutheim, F.; Kantolic, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. *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.
76. Salinas, I. A. 2010. Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país. *In*: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 39-47.
77. Salvagioti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. Santa Fé, INTA. 2 p.
78. Sawchik, J.; Mas, C.; Pérez Gomar, E.; Bermúdez, R.; Pravia, V.; Giorello, D.; Ayala, W. 2010. Riego suplementario en pasturas: antecedentes de investigación nacional. *In*: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 141-153.
79. Severova, V. 1997. Clima del Uruguay. (en línea). Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Ciencias. Unidad de Meteorología. s.p. Consultado 11 mar. 2106. Disponible en [http://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/Uy\\_c-info.htm](http://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/Uy_c-info.htm)
80. Shibles, R. M.; Weber, C. R. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Science*. 6 (1): 55-59.

81. Shurtleff, W.; Aoyagi, A. 2009. History of soybeans and soyfoods in south america (1882-2009): extensively annotated bibliography and sourcebook. Lafayette, USA, Soyinfo Center. pp. 1-15.
82. Sincik, M.; Candogan, B. N.; Demirtas, C.; Büyükcangaz, H.; Yazgan, S.; Göksoy A. T. 2008. Deficit Irrigation of Soya Bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid Climate. Journal of Agronomy and Crop Science. 194 (3):200-205.
83. Toledo, R. 2013. Soja: su ecofisiología y manejo. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 31 p. Consultado 10 mar. 2016. Disponible en <http://www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Cultivo-de-soja-Cordoba.pdf>
84. Toribio, M. 2008. Cómo mejorar la eficiencia de uso del agua. (en línea). Profertil. Investigación y Desarrollo. Boletín no. 14: 1-8. Consultado 13 mar. 2016. Disponible en <http://www.profertilnutrientes.com.ar/archivos/boletin-14---como-mejorar-la-eficiencia-en-el-uso-del-agua>
85. 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 14 mar. 2016. Disponible en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/31/2AM31.htm>
86. Wani, S. P.; Heng, L. K.; Vaja, N. R. 2012. Soya o soja. (en línea). In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. eds. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Roma, FAO. pp. 130-138 (Estudio FAO. Riego y Drenaje no. 66). Consultado 13 mar. 2016. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

9. ANEXOS

Anexo No. 1. Croquis del campo experimental.

<b>B I</b>	RD 50 % BH	RDC R1-R6	RDC PV-PC	BH	RDC PC
<b>B II</b>	BH	RDC R1-R6	RDC PV-PC	RDC PC	RD 50 % BH
<b>B III</b>	RDC PV-PC	RDC PC	BH	RD 50 % BH	RDC R1-R6

Anexo No. 2. Parcelas de soja, donde se observan los simuladores de sequía con que se cubrió las parcelas con deficiencias hídricas provocadas y el sistema de riego por goteo.

