

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESTRATEGIAS DE RIEGO EN SOJA:
¿RIEGO DEFICITARIO O RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO?

por

Silvina Marisel SCHÖLDERLE MORALES
Darío Javier UMPIÉRREZ CABRERA

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2019

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. (Dr.) Luis Giménez

Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. (MSc.) Raquel Hayashi

Fecha: 1 de marzo de 2019

Autores: -----

Silvina Marisel Schölderle Morales

Darío Javier Umpiérrez Cabrera

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por el apoyo incondicional durante estos años de estudio, sin ellos nada de esto hubiese sido posible. Gracias Mamá, Ale, Mario y Henry, este logro también es de ustedes.

Gracias a mis amigos por estar siempre, en las victorias y en aquellos momentos no tan buenos donde más los necesité, y me ayudaron a nunca bajar los brazos.

A la Facultad de Agronomía por dejarme recorrer este camino de muchas enseñanzas, tanto profesionales como cotidianas, que sobre todas las cosas me dejó amigos para toda la vida.

Este agradecimiento también va dedicado a la Lic. Sully Toledo y a todo el personal de biblioteca por su constante apoyo durante este trabajo, y al Ing. Agr. Dr. Luis Giménez por haberme dado la oportunidad de realizarlo.

Silvina.

La familia siempre está primero, y esta no puede ser la excepción. Por eso, mi mayor agradecimiento es para mi familia, no solo por su ayuda a lo largo de este proceso sino en toda mi vida, formando quien soy actualmente.

Agradezco también a todos mis amigos, los que siempre de una forma u otra están cuando se los necesita, apoyando y dando siempre para adelante. También, a todos los compañeros de facultad que formaron parte de este ciclo, haciendo más llevadero el día a día.

A Juan Larrama, Richard Arévalos, Federico Rovegno y la gente del laboratorio por su gran ayuda en la parte práctica. Gracias también a la Lic. Sully Toledo y todo el personal de biblioteca por su amabilidad y su colaboración para elaborar esta tesis. Muchas gracias a la Facultad de Agronomía en general, por esta hermosa carrera.

Darío.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA SOJA.....	3
2.2 REQUERIMIENTOS PRINCIPALES DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y RENDIMIENTO.....	6
2.2.1 <u>Fotoperiodo</u>	6
2.2.2 <u>Temperatura</u>	7
2.3 IMPORTANCIA DEL AGUA EN SOJA.....	8
2.3.1 <u>Producción de materia seca</u>	8
2.3.2 <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u>	9
2.3.3 <u>Fijación biológica de nitrógeno</u>	10
2.3.4 <u>Deficiencias hídricas</u>	10
2.4 DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO.....	13
2.4.1 <u>Consumo de agua</u>	13
2.4.2 <u>Eficiencia de uso del agua</u>	14
2.5 ESTRATEGIAS DE RIEGO.....	15
2.5.1 <u>Manejo del agua de riego</u>	15
2.5.2 <u>Riego suplementario</u>	18
2.5.3 <u>Riego deficitario</u>	19
2.5.3.1 Estrategias de riego deficitario.....	20
2.5.3.2 Riego deficitario en soja.....	21
2.5.4 <u>Riego deficitario controlado en soja</u>	22

3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	25
3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO.....	25
3.2 MANEJO DEL EXPERIMENTO.....	25
3.2.1 <u>Tratamientos</u>	27
3.3 DETERMINACIONES EFECTUADAS.....	28
3.4 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO.....	29
3.4.1 <u>Hipótesis biológica</u>	29
3.4.2 <u>Diseño experimental</u>	29
3.5 CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL EXPERIMENTO.....	29
3.5.1 <u>Precipitaciones, radiación solar incidente y temperatura</u>	29
3.6 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO EN EL SUELO PARA LOS TRATAMIENTOS.....	32
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	37
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL EXPERIMENTO.....	37
4.1.1 <u>Condiciones climáticas durante el periodo crítico</u>	37
4.1.2 <u>Agua disponible en el suelo para los distintos tratamientos</u>	38
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EXPERIMENTO.....	39
4.2.1 <u>Efecto de las distintas disponibilidades hídricas en el rendimiento y sus componentes</u>	39
4.2.1.1 Relaciones entre el rendimiento y componentes principales del rendimiento.....	41
4.2.2 <u>Altura de planta a R6 y nudos por planta para cada estrategia evaluada</u>	43
4.2.3 <u>Materia seca y tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico de determinación del rendimiento</u>	45
4.3 EFECTO DE LA ESTRATEGIA DE RIEGO SOBRE EL CONSUMO DE AGUA.....	47
4.3.1 <u>Agua efectiva</u>	47
4.3.2 <u>Evapotranspiración</u>	48
4.3.3 <u>Eficiencia de uso del agua</u>	50
4.4 IMPORTANCIA DE LA ESTRATEGIA DE RIEGO.....	51

5. <u>CONCLUSIONES</u>	54
6. <u>RESUMEN</u>	56
7. <u>SUMMARY</u>	58
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	60

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas principales del suelo.....	25
2. Calendario de eventos fenológicos del cultivo.....	27
3. Rendimiento en grano (kg ha^{-1}), número de granos m^{-2} y peso de 1000 granos (g) para los tratamientos.....	39
4. Subcomponentes del rendimiento en los tratamientos evaluados.....	43
5. Altura de planta (cm) y nudos fértiles por planta para cada uno de los tratamientos evaluados.....	45
6. Materia seca (MS, kg.ha^{-1}) al inicio y al final del periodo crítico y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) para los diferentes tratamientos.....	46
7. Evapotranspiración del cultivo (ETc) para cada etapa y total (mm) en el tratamiento bienestar hídrico (BH) y evapotranspiración ajustada (ETc aj y ETc aj total) para cada etapa y cada tratamiento (mm).....	48
Figura No.	
1. Croquis del experimento.....	26
2. Precipitaciones (mm) durante el 2016-17 y valores promedio de la serie histórica 1961-1990.....	30
3. Radiación solar incidente ($\text{MJ.m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) durante el 2016-17 y valores promedio del periodo 2002-2015.....	31
4. Temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$) para 2016-17 y valores promedio del periodo 2002-2015.....	32

5. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC) en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).....	33
6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario controlado en vegetativo y periodo crítico (RDC Veg+PC) en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).....	34
7. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario controlado (RDC) en R3-R6 en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).....	35
8. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario (RD) en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).....	36
9. Relación entre rendimiento (kg ha^{-1}) y número de granos (granos m^{-2}).....	42
10. Relación entre rendimiento (kg ha^{-1}) y peso de mil granos (g).....	42
11. Relación entre altura de planta (cm) y rendimiento (kg ha^{-1}).....	44
12. Agua efectiva (mm) en cada tratamiento evaluado.....	47
13. Relación entre la evapotranspiración del cultivo (ETc , mm) y el rendimiento (kg ha^{-1}) para los tratamientos evaluados.....	50
14. Eficiencia de uso del agua (EUA, $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) para los diferentes tratamientos evaluados.....	51
15. Relación entre riego efectivo (mm) y rendimiento (kg ha^{-1}).....	52

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en Uruguay en las últimas dos décadas presentó importantes cambios, dentro de los cuales se destaca el aumento de la superficie de siembra de cultivos de verano, principalmente de soja, siendo actualmente este cultivo uno de los principales productos de exportación del país, asociado fundamentalmente al incremento de los precios del grano y a la creciente demanda mundial liderada por China.

Los rendimientos medios registrados de soja en el país muestran una gran variabilidad interanual, siendo las dos últimas zafras un claro ejemplo de ello. La zafra 2016 se caracterizó por niveles de producción récord, alcanzando un rendimiento medio de 2951 kg ha⁻¹, mientras que en la zafra 2017 el rendimiento medio fue de 1214 kg ha⁻¹. Esta importante variación se explica, en gran medida, por la disponibilidad hídrica, la cual ha sido identificada en el país como la principal limitante ambiental en los cultivos de verano realizados en secano. La baja capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) de los suelos y la dependencia casi exclusiva de las precipitaciones (PP) para su recarga, caracterizadas por presentar elevada variabilidad en ocurrencia, intensidad y volumen, son las principales causas de esa problemática.

La inclusión del riego en los sistemas productivos posibilita disminuir la vulnerabilidad de los mismos y alcanzar rendimientos potenciales por ser una tecnología que permite tanto maximizar como estabilizar la producción de los cultivos estivales. En el país la superficie bajo riego ha crecido en los últimos años, sin embargo, aún sigue siendo pequeña la proporción en relación al área agrícola total. Una de las causas principales que explica la baja adopción del riego a nivel comercial, se encuentra en los elevados costos económicos que implica el riego en el país.

El crecimiento de la agricultura bajo riego requiere producir más con costos menores, y esto implica aumentar la productividad del agua. La necesidad de disminuir el uso de agua y ser más eficiente, lleva a estudiar estrategias de riego que logren cumplir ese objetivo. El riego deficitario (RD) es una estrategia mediante la cual el volumen de agua aplicado se reduce a una fracción de la demanda evaporativa, que se mantiene invariable a lo largo del ciclo (García-Tejero et al., 2011). Por otra parte, considerando la diferente sensibilidad de las etapas de desarrollo del cultivo en las que ocurren las deficiencias hídricas y los efectos sobre el rendimiento, surge la estrategia de riego deficitario controlado (RDC), la misma consiste en un esquema de riego en el cual se expone a las plantas a un nivel determinado de déficit hídrico durante una etapa particular del ciclo de desarrollo (Kirda, 2002).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes estrategias de manejo del riego sobre el rendimiento de soja, basado en la sensibilidad diferencial de las distintas etapas de desarrollo del ciclo a las deficiencias hídricas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA SOJA

La soja (*Glycine max*) es una leguminosa originaria de China, que data de 4000-5000 años atrás (KeShun, 1997) y ha logrado convertirse en uno de los principales commodities de origen agropecuario por ser una gran fuente de proteína para los humanos al igual que para los animales (Pagano y Miransari, 2016).

A nivel mundial EE.UU. es el país con mayor producción, con 117 millones de toneladas (FAO, 2017) lo cual representa el 50% aproximadamente de la producción mundial de grano de soja. En América Latina, Brasil y Argentina se encuentran entre los mayores productores (Pagano y Miransari, 2016) con 96 y 58 millones de toneladas de producción respectivamente, mientras que, en Uruguay, la producción de soja se ubica en 2 millones de toneladas (FAO, 2017).

El ciclo biológico se divide en dos grandes etapas, vegetativa y reproductiva, pudiendo subdividirse esta última en floración, fructificación y maduración (Fehr y Caviness, 1977). La etapa vegetativa comienza con la emergencia de la plántula sobre la superficie del suelo y se extiende hasta la aparición de la primera flor en cualquier nudo de la planta (Fehr y Caviness, 1977) teniendo una duración de seis a ocho semanas (KeShun, 1997). La etapa reproductiva inicia con la floración, que se caracteriza por su gran producción de flores (Nakayama, 1980) y culmina con la madurez, es decir, cuando el 95% de las vainas alcanzan el color típico (Fehr y Caviness, 1977). KeShun (1997) indica que esta etapa presenta una duración total de siete a doce semanas aproximadamente.

Para una correcta identificación de los estadios morfológicos de la soja, Fehr y Caviness (1977) establecen una escala de descripción universal para la misma. En esa escala la etapa vegetativa se indica con la letra V, seguido de una identificación numérica que representa el número de nudos del tallo principal, a excepción de los dos primeros estadios, emergencia (VE, cotiledones sobre la superficie del suelo) y cotiledonar (VC, hojas unifoliadas cuyos bordes no se tocan). Los estadios reproductivos son indicados con la letra R, también seguidos de una referencia numeral, la cual en este caso indica la presencia o tamaño de órganos reproductivos en los nudos superiores del tallo (Kantolic et al., 2003). Dentro de la etapa reproductiva se encuentran ocho estadios, que van desde floración (R1-R2), formación de vainas (R3-R4), formación de granos (R5-R6) a maduración (R7-R8, Fehr y Caviness, 1977).

La especie se caracteriza por presentar sensibilidad al fotoperiodo, lo que significa que la transición entre la etapa vegetativa y reproductiva es dependiente de la duración del día. A medida que los días se acortan, aumenta la respuesta, por lo tanto, es considerada una especie de día corto (Cregan y Hartwig, 1984). El umbral de horas de luz por debajo del cual se induce la floración depende de cada cultivar y define a que grupo de madurez (GM) pertenece. La clasificación más difundida es la originada en EE.UU., que divide a los cultivares en 12 grupos que van desde el 00 al X, ordenados de manera creciente en términos de requerimientos de fotoperiodo, es decir, los cultivares de los GM más bajos poseen umbrales fotoperiódicos más altos, lo cual implica que para un fotoperiodo dado florecen y maduran antes que aquellos que pertenecen a GM más altos, por lo tanto, se adaptan mejor a las latitudes altas (Nakayama, 1980). En Uruguay, los GM utilizados comercialmente van desde el grupo III al grupo VIII (Giménez, 2010).

Una vez comenzada la floración, el cultivo presenta gran parte de su aparato fotosintético formado (KeShun, 1997). La especie se caracteriza por iniciar la floración con la diferenciación de un meristema axilar, mientras que el ápice permanece vegetativo por un período más o menos prolongado de tiempo (Sadras et al., 2000), lo cual es dependiente del GM y de las condiciones ambientales (KeShun, 1997) pero en mayor medida del hábito de crecimiento (Bernard, 1972). Esto conlleva a que al mismo momento se estén diferenciando órganos reproductivos y hojas en la misma planta (Sadras et al., 2000).

La soja puede tener un hábito de crecimiento determinado, semideterminado o indeterminado dependiendo de la variedad (Bernard, 1972). Las variedades con hábito de crecimiento determinado, prácticamente culminan la producción de nudos en el tallo principal cuando inicia la floración, y desarrollan en el extremo apical del mismo un racimo floral (Toledo, s.f.). La soja con crecimiento semideterminado en cambio, continúa con la producción de nudos posterior a R1 y se caracteriza por no presentar un racimo floral apical importante (Kantolic, 2008). Por último, el tipo de crecimiento indeterminado, continúa con la producción de nudos posterior a R1, pero en este caso, puede llegar a duplicarse o triplicarse en número los nudos formados luego de la floración (Toledo, s.f.). En las variedades con este tipo de crecimiento también se puede llegar a formar un racimo terminal más o menos importante (Bernard, 1972). La superposición del crecimiento vegetativo con el reproductivo es en el orden de 20% y de 40% en las variedades de hábito determinado e indeterminado respectivamente (Nakayama, 1980).

El rendimiento se encuentra determinado por dos componentes numéricos principales: el número de granos (NG) por superficie y el peso de los mismos. El NG se subdivide en tres subcomponentes: plantas por superficie,

vainas por planta y granos por vaina. Las plantas por superficie determinan el número de nudos por unidad de área, los cuales representan la cantidad de sitios potenciales para la formación de granos. Este componente tiene un efecto neutro sobre el rendimiento debido a la capacidad de compensar una baja densidad de plantas que posee la soja, ya sea aumentando la producción de nudos en las ramificaciones o mejorando la fertilidad de cada nudo. La fertilidad de cada uno de esos sitios determina cuántas vainas se formarán por nudo, pueden encontrarse entre 1 y 20 vainas por nudo, teniendo en cuenta que existe una amplia variabilidad entre nudos de la misma planta. El número de vainas por nudo es un componente afectado por las condiciones climáticas, la ocurrencia de deficiencias hídricas o cualquier otra situación de estrés que comprometa la fotosíntesis, reduce el número de vainas por nudo, al afectar la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en el momento de formación de las mismas. El número de granos por vaina en cambio tiene control genético, una vaina puede contener entre 1 y 4 granos, generalmente predominan los genotipos con 2 a 3 lóculos fértiles. El peso de los mil granos (PMG) oscila entre 140 y 220 g (Kantolic et al., 2003).

En soja, también existen momentos en los que hay superposición en la formación de órganos reproductivos (vainas y granos) lo cual determina que la magnitud del componente generado dependa, en gran medida, de la disponibilidad de asimilados disponibles en ese momento. Es por esto que la TCC tiene una relación directa con la generación y posterior supervivencia de los componentes numéricos que hacen al rendimiento (Cárcova et al., 2003).

El NG tiene alta correlación con el rendimiento y es por esto que se considera el componente más importante en definir el rendimiento (Egli, 1998). A pesar de que los subcomponentes del NG se definen desde la emergencia hasta la formación de los granos de la última vaina del cultivo, el periodo más crítico (PC) en la definición de rendimiento comprende fin de fructificación y todo la etapa de llenado de granos, R4-R6 según la escala fenológica de Fehr y Caviness (1977), pues las restricciones que sufra el cultivo en estos momentos, que afecten negativamente el crecimiento, tienen un efecto directo en el rendimiento al reducir el NG sin posibilidad de ser compensado posteriormente con mayor peso de los mismos (Kantolic et al. 2003, Cárcova et al. 2003).

2.2 REQUERIMIENTOS PRINCIPALES DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y RENDIMIENTO

Las plantas están expuestas a determinadas condiciones ambientales que pueden limitar su producción (Hasanuzzaman et al., 2016). Los factores ambientales que regulan el desarrollo en la soja son: el fotoperiodo, la temperatura y la interacción entre ambos (Kantolic et al., 2003), los cuales son los principales responsables de las variaciones en el rendimiento en ausencia de limitantes hídricas (Cooper 2003, Kantolic et al. 2003). Martignone et al. (2005) destacan la importancia de conocer la respuesta del cultivo frente a estos factores en diferentes situaciones, con el objetivo de lograr que el PC se desarrolle en las condiciones ambientales más favorables.

2.2.1 Fotoperiodo

La soja es una especie de día corto con respuesta cuantitativa, es decir, se retrasa la floración si el umbral de fotoperiodo se encuentra por encima de un valor crítico característico de cada cultivar, debido a que la tasa de desarrollo de los órganos reproductivos se vuelve más lenta (Baigorri, 1997).

El fotoperiodo regula los procesos que comprenden la etapa reproductiva, determinando el inicio de los mismos y la velocidad con la cual ocurren (Kantolic et al., 2003) siendo el efecto principal la inducción de la floración (Toledo, s.f.). La soja responde a fotoperiodos inductivos posteriormente a la etapa juvenil, la cual se caracteriza por ser corta, con una duración aproximada de ocho días desde la emergencia a temperaturas óptimas. A medida que los días se acortan, se aceleran los cambios de fase y con el transcurso del ciclo el cultivo aumenta la sensibilidad al fotoperiodo (Kantolic et al., 2003).

La magnitud del efecto del fotoperiodo cuenta con una amplia variabilidad genética, puesto que depende del GM al que pertenece el cultivo (Sadras et al., 2000). Los grupos largos tienen mayores requerimientos de luz para florecer que los cortos, lo que implica la necesidad de días con menos horas de luz (Kantolic et al., 2003). Esto determina mayor tiempo a floración y que el ciclo sea más largo, con respecto a los grupos cortos, a una condición de fotoperiodo determinada (Toledo, s.f.).

La edad de la planta a la cual se da la inducción floral determina el tamaño final de la misma y por tanto su potencial de rendimiento. El momento

que se da el mismo depende del fotoperiodo, del GM y de la fecha de siembra (Sadras et al., 2000). Las latitudes bajas presentan fotoperiodos más cortos en el verano respecto a las latitudes mayores (Cooper, 2003). En esas regiones se recomienda la siembra de GM largos, de lo contrario, la floración se adelanta acortándose la fase vegetativa, lo que tiene como consecuencia plantas muy pequeñas con baja producción de biomasa y baja fuente para llenar el grano, disminuyendo el rendimiento. El atraso de la fecha de siembra tiene un efecto similar, pues provoca una reducción del ciclo por acortamiento tanto de la fase vegetativa como de la fase reproductiva (Sadras et al., 2000).

La respuesta de la soja al fotoperiodo se puede modificar por efecto de la temperatura, dicho efecto es más importante en las plantas pertenecientes a GM con menor sensibilidad (ciclos cortos). Las temperaturas por debajo de 25°C atrasan la floración independiente del fotoperiodo (Toledo, s.f.).

2.2.2 Temperatura

La temperatura regula la duración de las distintas etapas del cultivo durante todo el ciclo (Salvagiotti et al., 2010) a diferencia del fotoperiodo que tiene efecto posterior a la fase juvenil. A medida que aumenta la temperatura por encima de la temperatura base (T_b), la tasa de desarrollo se incrementa. Si la temperatura supera el nivel óptimo, la tasa de desarrollo disminuye. La respuesta es universal, es decir, no hay diferencias entre los GM (Kantolic, 2008).

El rango de T_b se encuentra entre 6 °C y 9 °C y las temperaturas óptimas oscilan entre 25 °C y 30 °C, siendo la temperatura máxima de 40 °C (Kantolic et al., 2003). Farias et al. (2007) sostienen que para un correcto establecimiento del cultivo la siembra se debe realizar con temperaturas del suelo superiores a 20 °C.

La temperatura también afecta el desarrollo, el establecimiento y el crecimiento de los órganos reproductivos (Kantolic, 2008). Según Salvagiotti et al. (2010), la temperatura óptima para el desarrollo de las vainas es de 26 °C y 24 °C para el llenado de grano. Las temperaturas más bajas que la óptima favorecen el desarrollo de malformaciones en las flores y promueven el aborto y abscisión de vainas (Kantolic, 2008) al igual que temperaturas más elevadas, las cuales disminuyen la fotosíntesis y también provocan el aborto y abscisión de estructuras reproductivas (Prased et al., 2002). Además de regular el desarrollo durante todo el ciclo de cultivo (Kantolic et al., 2003), la temperatura tiene efecto en la fijación biológica de nitrógeno. Las altas temperaturas de

suelo, mayores a 34 °C, afectan significativamente dicho proceso (Sinclair y Weisz, 1985).

2.3 IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA SOJA

2.3.1 Producción de materia seca

El cultivo debe desarrollar un canopeo que le permita maximizar la captación de radiación en la etapa reproductiva temprana en ausencia de limitantes hídricas y nutricionales (Salvagiotti, 2009). Las condiciones que permiten lograr altas producciones de biomasa, están asociadas a elevadas radiaciones y temperaturas diurnas óptimas para el proceso fotosintético que permitirán lograr altas TCC y prolongada duración de las etapas fenológicas (Andrade et al., 2000a). Sin embargo, cuando el suelo se encuentra con un contenido hídrico fuera del rango 40-60% de agua disponible (AD), las plantas ven comprometido su crecimiento. La caída de la producción de biomasa de una planta que se encuentra sometida a estrés hídrico se debe a una reducción en la tasa fotosintética, explicada por menor intercepción de radiación, que trae como consecuencia menor expansión de las hojas y/o mayor senescencia que lleva a disminuir la eficiencia de conversión, lo que repercute en menor producción de biomasa (Andrade y Sadras, 2000b).

Según Mondino y Gómez (2006) el momento de mayor acumulación de materia seca (MS) vegetativa ocurre poco después de R5.5, mientras que los máximos de MS reproductiva se dan al comienzo de R7, momento en el cual también se alcanzan los mayores valores de MS total. Shibles et al., citados por Mondino y Gómez (2006) afirman que una alta producción de MS durante la fase vegetativa es indispensable para lograr altos rendimientos, debido a que el rendimiento es función directa de la producción de biomasa.

Mondino y Gómez (2006) en ensayos realizados en Santiago del Estero en los años 2002-03 y 2003-04, en soja bajo riego con distanciamiento entre hileras de 0,35 m, encuentran que el máximo volumen de MS se registró en R7 con una producción de 14.600 kg ha⁻¹.

De manera similar, Giménez (2014a) en ensayos realizados en la Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni" de la Facultad de Agronomía en Paysandú, en soja sin deficiencias hídricas, encontró que la máxima acumulación de MS ocurrió en R6 con producciones de 8.400 y de 16.200 kg ha⁻¹ para los años agrícolas 2009-10 y 2010-11, respectivamente. El autor

sostiene que las diferencias entre las zafas son adjudicadas a la reducida radiación solar (RS) incidente a causa de los excesos de PP que ocurrieron en el primer año experimental, que no permitieron expresar el potencial de producción de MS. El resultado obtenido para la zafa 2010-11 superó a la producción lograda por Andrade et al. (2000a) de 12.000 kg ha⁻¹ en ensayos realizados en la región de Balcarce, Argentina.

2.3.2 Tasa de crecimiento del cultivo

La TCC es un índice que refleja la tasa de acumulación de MS por unidad de superficie y por unidad de tiempo (Bodrero, 2003). La TCC es función directa de la RS interceptada (Shibles et al., citados por Mondino y Gómez, 2006) alcanzando su máximo valor cuando el canopeo es capaz de interceptar el 95% de la RS incidente, cuando se alcanza el índice de área foliar (IAF) crítico (Mondino y Gómez, 2006). El logro de altas TCC durante el PC permite maximizar la cantidad de granos fijados (Quijano et al., citados por Bodrero, 2003) por lo que es muy importante para que el rendimiento no se vea afectado, que se logre evitar el estrés hídrico en ese momento del ciclo. El estrés hídrico provoca reducciones en la eficiencia de conversión y en la eficiencia de interceptación de la RS que generan como consecuencia una reducción en la TCC (Andrade y Sadras, 2000b). En el caso particular de situaciones con sequías tempranas, es importante que el efecto de las mismas en la reducción de crecimiento no sea persistente para que no se afecte el desarrollo normal del cultivo durante el PC, y por lo tanto el rendimiento, de lo contrario, el cultivo es capaz de recuperarse no afectando la producción de grano (Andrade y Sadras, 2000b).

Baigorri (1997) reporta que la TCC promedio diaria para todo el ciclo en Argentina se encuentra entre 83 y 186 kg ha⁻¹ día⁻¹, mientras que Andrade et al. (2000a) encontraron una TCC, para el periodo que va desde el día 40 al 80 post emergencia, que varía entre 172 y 188 kg ha⁻¹ día⁻¹ en ensayos conducidos en la Estación Experimental de Balcarce en soja bajo riego. Por otra parte, en EE.UU., Shibles et al., citados por Mondino y Gómez (2006), afirman que la TCC durante la fase lineal de crecimiento toma valores que oscilan en el rango de 86 y 186 kg ha⁻¹ día⁻¹.

En lo que respecta a los antecedentes de TCC en Uruguay, Foster y Rovegno (2015) en ensayos llevados a cabo en Paysandú, obtuvieron un crecimiento promedio durante el PC de 94 kg ha⁻¹ día⁻¹, asociado a las condiciones climáticas en las que transcurrió el experimento, RS por debajo de la media histórica y PP por encima de la misma. Por otro lado, Friza et al.

(2018) reportaron para la misma localidad una TCC promedio de $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

2.3.3 Fijación biológica de nitrógeno

De igual manera, así como se busca evitar limitantes hídricas para que no se afecte la eficiencia de intercepción y por tanto no se vea perjudicada la TCC, es importante lograr una buena nutrición del cultivo (principalmente nitrogenada). La cantidad de nitrógeno que la planta puede acumular en la biomasa total es otro de los factores determinantes del rendimiento en soja. La planta puede obtener el nitrógeno que necesita tanto del aporte que realiza el suelo como de la fijación biológica de nitrógeno (Bodrero, 2003). La fijación biológica aporta entre 50-80% del nitrógeno requerido por la planta en condiciones sin limitantes hídricas (Salvagiotti, 2009). La nodulación es un proceso que tiene lugar en las primeras etapas del ciclo del cultivo, al igual que la mayor fijación biológica. Al día 60 el nitrógeno en los nódulos es máximo y posterior a este momento disminuye drásticamente (Pahalwan y Tripathi, 1984). El balance de nitrógeno para el cultivo de soja se considera neutro según Salvagiotti (2009), aunque puede llegar a ser negativo en situaciones de altos rendimientos.

Uno de los factores más importantes que limita la fijación biológica de nitrógeno es la deficiencia de agua (Hera, 1978). Según lo expresado por Pahalwan y Tripathi (1984), la humedad del suelo necesaria para una adecuada formación de nódulos es la misma que se requiere para la germinación, la cual permite fijar altos niveles de nitrógeno atmosférico en suelo. Sin embargo, los autores afirman que un excesivo nivel hídrico en el suelo es perjudicial para dicho proceso debido a la falta de oxígeno que se genera. Además de afectar el proceso de nodulación, el estrés por deficiencias hídricas también genera una reducción en la fijación biológica de los nódulos ya formados. Esta situación se revierte cuando la condición hídrica es recuperada (Bennett y Albrecht, 1984), sin embargo, la magnitud de dicho efecto depende de los cultivares (Kucey, 1988).

2.3.4 Deficiencias hídricas

Cruz et al. (2000) definen las deficiencias hídricas como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) en condiciones estándar y la

evapotranspiración real (ETr). Las mismas son consideradas a nivel mundial, la mayor limitante a la producción agropecuaria (Boyer, citado por Giménez, 2014a) y una de las principales limitantes ambientales a las que se enfrenta la soja realizada en secano en el Uruguay (Giménez y García Petillo, 2011).

La soja comienza a experimentar deficiencias hídricas que comprometen la producción cuando el contenido de AD del suelo se encuentra por debajo de 40-60%. Los valores más bajos corresponden a las etapas del ciclo previo a la floración, en las cuales las raíces son capaces de crecer a grandes profundidades y a baja demanda atmosférica, mientras que, los valores más altos se asocian a las etapas reproductivas, en las que el cultivo de soja es más sensible al déficit hídrico y los umbrales inferiores al 50% de AD ocasionan restricciones en la producción de MS (Dardanelli et al., 2003).

Según Andrade y Sadras (2000b), la soja sometida a deficiencias hídricas presenta una disminución en la producción de biomasa que está asociada a un menor IAF, explicado por la reducción en la eficiencia de interceptación de la RS y en la eficiencia de conversión y al efecto negativo que tienen las deficiencias hídricas en el crecimiento, afectando la división y la expansión celular (Dardanelli et al., 2003). En este sentido, Capurro (2016) sostiene que la altura de planta es afectada por la disponibilidad hídrica y que muestra una evolución diferencial, durante el ciclo según el agregado de agua. La autora reporta que el tratamiento sin riego alcanzó una altura de planta de 70 cm, mientras que, en los tratamientos regados, llegó a 105 y 110 cm.

Las plantas son capaces de adecuar la dimensión de su superficie transpirante frente a deficiencias hídricas, regulando la pérdida de agua a través de disminuir la RS incidente interceptada. Otro mecanismo que, en el corto plazo, permite reducir el área foliar expuesta a la RS es el marchitamiento de las hojas producto de la pérdida de turgencia que provoca el estrés hídrico, lo cual permite disminuir la interceptación de RS, mejorando así el estado hídrico del cultivo. Cabe destacar que si el déficit se incrementa el proceso de reducción del área transpiratoria se intensifica a través de la senescencia foliar (Dardanelli et al., 2003).

La magnitud de la respuesta del cultivo a las deficiencias hídricas depende de la intensidad, la duración y el momento del cultivo en el que se producen (Andriani et al., 1991). El momento en el que ocurre el estrés es importante porque para un nivel de deficiencia determinado el efecto es distinto según el estado del cultivo. En la etapa que va desde la emergencia a la floración (VE-R1), deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50% de AD) no producen reducciones en el rendimiento, si bien pueden disminuir el IAF y la altura de la planta. Sin embargo, intensidades mayores (20-40% de AD) pueden llegar a disminuir rendimiento en el orden del 10% (Andriani, 1997).

Las deficiencias hídricas durante el periodo que comprende la floración (R1-R2) tienen poco efecto sobre el NG según Karam et al. (2005). Dichos autores indican que provocar deficiencias hídricas durante dos semanas en R2 reduce la producción de biomasa en un 16% en comparación con el testigo (riego completo durante todo el ciclo), sin embargo, no hay reducciones significativas en el NG ni en el peso de los mismos, lo que muestra que los componentes del rendimiento de la soja son capaces de recuperarse de cualquier efecto de estrés hídrico en la etapa R2. Esto sugiere que la detención del riego en plena etapa de floración puede ser benéfico para el rendimiento y, al mismo tiempo, permite ahorrar agua de riego en zonas donde es un recurso limitado.

Por el contrario, las limitantes hídricas durante la formación de las vainas (R3-R4) y el comienzo de formación de los granos (R5) tienen efectos significativos sobre el rendimiento (Krote et al., Huck et al., Foroud et al., citados por Karam et al., 2005). El cultivo se vuelve muy sensible a la ocurrencia de deficiencias hídricas de R4 a R6, es decir durante el periodo más crítico de determinación del rendimiento, debido a que, en ese momento, la capacidad de compensación del mismo se ve reducida, consecuencia de que, al aborto floral por deficiencias hídricas, se le agrega el de las vainas de menor tamaño, que son las estructuras reproductivas que presentan mayor susceptibilidad de abscisión (Giménez y García Petillo, 2011). Karam et al. (2005) reportan que inducir deficiencias hídricas en la etapa de formación de granos (R5), provoca reducciones en el NG en un 20% y del peso de los mismos en un 10% con respecto al testigo, resultando en una reducción en rendimiento en el entorno del 28%, mientras que la biomasa se ve afectada solamente en un 6%. El pequeño efecto sobre la biomasa se atribuyó al crecimiento de la misma previo a la ocurrencia del estrés hídrico. Esto coincide con lo observado por Andrade y Sadras (2000b), Desclaux et al. (2000), quienes afirman que la etapa reproductiva es la más sensible a la falta de agua, sobre todo en fases más avanzadas. En este sentido Andriani (1997) afirma que las deficiencias hídricas severas (20-40% de AD) durante la etapa R5-R7 pueden llegar a reducir el rendimiento en 40% o más. De igual manera, Momen et al., Cox y Jolliff, citados por Karam et al. (2005) encontraron que la soja es más sensible al estrés hídrico durante la formación de los granos (R5-R6).

La soja, presenta buena capacidad de compensar daños causados por estrés hídrico debido a sus características morfo-fisiológicas: capacidad de ramificación, extenso periodo de floración y producción excesiva de flores (Andrade et al., 2000a). La planta es capaz de censar la condición hídrica del suelo y en caso de tratarse de una situación de deficiencia hídrica, la misma busca aumentar la eficiencia de uso del agua (EUA) mediante el control estomático. Como respuesta a esta condición, en las raíces se incrementa la

síntesis de ABA, el cual se dirige hacia las hojas donde su función es reducir la conductancia estomática. Este mecanismo permite el cierre parcial de los estomas en momentos determinados cuando la condición hídrica del suelo es limitante logrando mejorar la EUA en la planta (Liu et al., 2004).

2.4 DEMANDA DE AGUA DEL CULTIVO

2.4.1 Consumo de agua

Las necesidades de agua para el cultivo están determinadas por la evapotranspiración (ET). La misma se encuentra conformada por dos componentes: evaporación y transpiración; pérdida directa de agua del suelo hacia la atmósfera y pérdida de agua desde la planta hacia la atmósfera respectivamente. La importancia relativa de cada uno de ellos es diferente con respecto al crecimiento del cultivo, ya que la evaporación ocasiona la disminución de los niveles de reserva de agua del suelo, pero no contribuye a la formación de biomasa, sobre todo es importante en las primeras etapas del ciclo del cultivo donde aún no se ha cubierto por completo el suelo (Andriani, 1997). A medida que el cultivo se desarrolla y ocupa más área, es decir sombrea más el suelo, la transpiración pasa a ser el proceso principal (Allen et al., 1998).

Según Giménez y García Petillo (2011) la ET está determinada por tres factores: las características del cultivo, la RS incidente y la duración del período de exposición a la misma. Además, se encuentra afectado tanto por las condiciones climáticas de la región, como por el efecto año (años "Niña" y "Niño" con los mayores y menores consumos de agua, respectivamente) como también por la época de siembra (Farias et al., 2007). El consumo total de agua sin restricciones para soja en Uruguay fue estimado por Giménez (2012) entre 420 y 520 mm, y se destaca la floración e inicio de fructificación (R1-R3) como la etapa de mayor consumo.

El volumen de agua que se debe suministrar para compensar la pérdida de agua del suelo por ET se denomina requerimiento de agua del cultivo y se puede cuantificar a través de la ETC. La ETC es la evapotranspiración de los cultivos en una situación controlada, es decir, la que experimenta un cultivo libre de enfermedades y sin limitantes tanto nutricionales como hídricas, que le permiten obtener el rendimiento potencial. En cambio, el requerimiento de agua de un cultivo que se desarrolla bajo condiciones no controladas se denomina

ETc ajustada (ETc aj). La ETc aj suele ser menor a la ETc debido a que representa el consumo de un cultivo bajo condiciones de campo y, por tanto, también se denomina ETr (Allen et al., 1998).

La ETc es un valor particular a cada situación, pues es dependiente del largo del ciclo, la demanda atmosférica y del área foliar desarrollada, y se calcula como el producto entre la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ETo) y el coeficiente del cultivo (Kc, Andriani, 1997). En tanto, la ETo es la evapotranspiración de un cultivo con características específicas, cuyo fin es reflejar el poder de evaporación de la atmósfera en un lugar y momento del año determinado. Es un parámetro que puede ser estimado a través de datos meteorológicos pues sólo es afectado por factores climáticos y no considera las características del cultivo, ni del suelo (Allen et al., 1998). El valor de Kc depende del estado del cultivo y de la ubicación geográfica del mismo (Andriani, 1997). Sincik et al. (2008) encontraron que la ETc aumenta de manera considerable a medida que aumenta el agua de riego aplicada, como resultado de ello, el rendimiento también se ve incrementado al aumentar la ETc. Dichos autores reportan una relación lineal entre ETc y el rendimiento, lo cual coincide con Capurro et al. (2017) quienes sostienen que la reducción en el rendimiento es directamente proporcional a la reducción en la ETc.

En Uruguay, la ETo presenta un claro comportamiento estacional. Los valores más altos se ubican en los meses de verano ($139\text{-}207\text{ mm mes}^{-1}$), lo cual se debe a que el balance de energía aumenta de manera considerable en los meses estivales respecto a los invernales. Los valores medios de ETo acumulada anual, según la ecuación de Penman-Monteith, rondan los 1000 y 1200 mm, registrándose los valores mínimos en el suroeste del país y aumentando hacia el noreste para todos los meses del año. Para la localidad de Paysandú, los valores máximos de ETo (207 mm) se dan en enero, lo cual a su vez coincide con los valores más altos de Kc teniendo en cuenta el desarrollo del cultivo, lo que lleva a que en esa época del año el consumo de agua del mismo sea el máximo del ciclo (Cruz et al., 2000).

2.4.2 Eficiencia de uso del agua

La biomasa producida por unidad de agua consumida expresa la eficiencia con la cual el cultivo fija carbono en relación con el agua que pierde. La acumulación de biomasa se expresa en rendimiento en grano, mientras que el agua consumida se expresa como ETc (Dardanelli et al., 2003).

Las buenas prácticas agronómicas deben derivar a un volumen de agua mayor hacia la transpiración del cultivo, ya que es el único gasto de agua productivo. La ETc acumulada es directamente proporcional a la producción de MS y toda otra vía de disminución del AD constituye a disminuir la productividad del agua (Micucci, 2014).

La dependencia de la EUA de las condiciones climáticas provoca que para una misma disponibilidad hídrica sea posible encontrar un amplio rango de valores de EUA. En soja sin deficiencias hídricas, Della Maggiora et al. (2000) reportaron valores de EUA que varían entre 5 y 11 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en ensayos realizados en Balcarce, al relacionar el rendimiento obtenido con el consumo de agua del cultivo. Karam et al. (2005) encuentran una EUA de 4,7 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en ensayos en soja sin limitantes hídricas en Tal Amara. Dichos autores indican que la EUA aumentó 13 y 4% sobre el testigo (sin limitantes hídricas) cuando se expuso al cultivo a deficiencias hídricas en R2 y R7, respectivamente. Esto concuerda con lo expresado por Fereres y Soriano (2007), quienes afirman que el aumento en EUA bajo riego deficitario con respecto al riego completo se debió a que la disminución del rendimiento, en términos relativos, fue menor que la disminución de la ETc. Sin embargo, las deficiencias hídricas en R5, disminuyen la EUA un 17% comparado al testigo (Karam et al., 2005). Estos resultados coinciden con Sincik et al. (2008) quienes encontraron que, al aumentar el volumen de agua de riego aplicado, el rendimiento aumenta, mientras que, la EUA disminuye.

En lo que respecta a los antecedentes de EUA en el país, Giménez (2014a), en ensayos conducidos en Paysandú en soja sin limitantes hídricas, reportó una EUA de 12 kg ha⁻¹ mm⁻¹, siendo uno de los valores más altos de productividad de agua encontrados para esa zona. En la misma localidad, Friza et al. (2018) obtuvieron una EUA de 9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para el mismo cultivar que el utilizado en este experimento, con bienestar hídrico durante todo el ciclo. Por otra parte, Capurro et al. (2017) en soja con riego completo, alcanzaron una EUA de 8,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹.

2.5 ESTRATEGIAS DE RIEGO

2.5.1 Manejo del agua de riego

A nivel mundial es posible encontrar dos situaciones con producción de cultivos bajo riego. En primer lugar, las regiones áridas, en las que el aporte de

agua de lluvia es insignificante y donde el riego es la única alternativa posible para poder producir. En segundo lugar, se encuentran las regiones de secano, donde es posible producir cultivos con el sólo aporte de las PP, donde el riego pasa a ser una técnica más de producción, que permite estabilizar y/o maximizar los rendimientos. Al comparar las dos regiones, en la primera el riego es un factor imprescindible, por lo que el volumen utilizado de dicho recurso será similar al volumen de agua total requerido por el cultivo, mientras que, en la segunda región, los requerimientos hídricos del cultivo son en parte cubiertos por las lluvias, presentando deficiencias de manera esporádica, lo que lleva a que el volumen de agua de riego presente gran variabilidad interanual (Andriani, 1997).

La producción de alimentos bajo riego representa el 40% del total mundial y solo se usa aproximadamente el 17% de la superficie dedicada a la producción de alimentos (Fereres y Connor, citados por Fereres y Soriano, 2007). En Uruguay, el sector agrícola en los últimos años ha presentado cambios importantes, dentro de los cuales se destaca el incremento en la superficie sembrada de cultivos estivales, siendo la soja el de impacto mayor (Giménez, 2010). La principal limitante ambiental que ha sido identificada en cultivos de verano es la disponibilidad hídrica (Andrade et al., Sawchik y Ceretta, citados por Giménez, 2010).

Giménez (2012) afirma que, la disponibilidad hídrica de los cultivos de verano está determinada por la influencia de tres factores: estación de crecimiento limitada por las temperaturas, baja CAAD de los suelos y dependencia casi exclusiva de las PP para su recarga. Los mismos establecen que la etapa crítica de crecimiento se ubica principalmente en los momentos de mayor demanda atmosférica y que la autonomía del suelo es entre el 20-30% del consumo de agua de los cultivos. La mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura presentan una CAAD que varía entre 80 y 160 mm (Molfino y Califra, citados por Giménez y García Petillo, 2011).

La escasa CAAD que poseen los suelos provoca que, en condiciones de secano, el cultivo sea dependiente de las recargas por parte de las PP para lograr un abastecimiento ajustado a su demanda (Giménez y García Petillo 2011, Giménez 2012). Según Corsi, citado por Giménez y García Petillo (2011), los balances hídricos de los suelos en los meses de diciembre, enero y febrero son en su mayoría negativos debido a que las PP efectivas no logran, en general, satisfacer la demanda atmosférica, sumado a que presentan alta variabilidad interanual en volumen, intensidad y distribución. Del mismo modo, la etapa crítica de determinación de rendimiento también es afectada y en general no se cubren las demandas atmosféricas, siendo la disponibilidad

hídrica durante el PC dependiente principalmente de la ocurrencia de lluvias antes y durante dicha etapa (Giménez y García Petillo, 2011).

En este escenario productivo, el riego es una herramienta a tener en consideración en los sistemas productivos para permitir tanto maximizar como estabilizar la producción de los cultivos estivales (GDR, 2010). No obstante, en Uruguay la agricultura extensiva, con excepción del arroz, se realiza mayoritariamente en secano (Giménez y García Petillo, 2011), como lo indica FAO (2016), a pesar de que la superficie bajo riego ha crecido en los últimos años, aún se encuentra muy lejos de la superficie potencial de riego que se estima en 1.760.000 ha y del total de área sembrada de cultivos de verano (Morales et al., 2014).

García Petillo (2012) afirma que el incremento del precio de la tierra, de los insumos y de los productos agropecuarios han sido determinantes para hacer rentable la inclusión del riego en los sistemas de producción uruguayos. Sin embargo, este crecimiento en las áreas regadas no ha sido acompañado en similar medida por la formación de técnicos y productores en los conceptos básicos para el diseño y la operación del riego. Es por ello que el autor explica que regar bien, es darles a las plantas el volumen de agua necesario en el momento oportuno, es decir, antes de que el contenido hídrico del suelo les genere un estrés que pueda afectar el rendimiento. También es de suma importancia que el volumen de agua agregado llegue de manera uniforme a toda la parcela, pues de lo contrario será mayor el volumen de agua que se deba aplicar para que toda la parcela quede bien regada.

El volumen de agua a aplicar, conocido como lámina de riego, depende de los parámetros hídricos del suelo. A los efectos del riego, no se considera la totalidad del perfil sino la porción de suelo donde se encuentra la masa radicular absorbente (García Petillo, 2012). El agua de riego es la resultante de la diferencia entre el requerimiento de agua del cultivo y el aporte que realizan las PP (en un riego completo, Allen et al., 1998). Para la planificación del riego se estima el contenido de agua del suelo a través de un balance hídrico. El mismo tiene en cuenta la ET_c y la CAAD (Andriani, 1997).

El suelo posterior a recibir un evento de PP se encuentra como suelo saturado, es decir, con su estructura porosa (macro y microporos) completa de agua. Esta condición provoca anoxia que no permite que las raíces puedan absorber agua. La situación ideal para la absorción de agua por parte del cultivo ocurre entre las 24 a 72 horas posteriores, donde solamente los microporos quedan llenos de agua, esta condición del suelo se denomina capacidad de campo (CC, García Petillo, 2012). A medida que aumenta el consumo de agua, el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que hará más difícil su extracción por las plantas, hasta un punto donde el

cultivo no podrá extraer el agua remanente. En este momento, se alcanza el punto de marchitez permanente (PMP), en esta condición las plantas se marchitan y mueren (Allen et al., 2006). En síntesis, el cultivo sólo puede extraer el agua comprendida entre CC y PMP, la cual se denomina AD (García Petillo, 2012).

El volumen de agua que extrae el cultivo deberá compensar la demanda atmosférica para que no se vea afectado el rendimiento. Hay momentos en los que el volumen de agua absorbido no es suficiente para satisfacer la demanda y el cultivo sufre estrés. El punto que separa la extracción de agua que se da en confort hídrico del cultivo, de la que se da con estrés se denomina umbral de riego (UR), también llamado porcentaje máximo de agotamiento del AD para no sufrir estrés (%p). Este parámetro depende del cultivo, de su etapa de desarrollo, del tipo de suelo y de la demanda atmosférica (García Petillo, 2012). La fracción del AD que se encuentra entre CC y UR se denomina agua fácilmente aprovechable (AFA, Allen et al., 2006) o también agua fácilmente disponible (AFD). En síntesis, el riego completo, consiste en dejar secar el suelo hasta llegar al UR, en ese momento se debe aplicar un volumen de agua igual al AFD para llevar el contenido hídrico del suelo nuevamente a CC (García Petillo, 2012).

2.5.2 Riego suplementario

Una de las estrategias de riego se conoce como riego suplementario, la misma se basa en complementar el aporte que realizan las lluvias. Su principal objetivo es mantener la producción en periodos de sequía y evitar variaciones de rendimientos interanuales dadas por deficiencias hídricas (Fereres y Soriano, 2007). El uso de riego suplementario en soja permite obtener mayores rendimientos frente a condiciones de secano, más precisamente, Rodríguez et al. (s.f.) en ensayos realizados en EEA INTA Concepción del Uruguay en soja con tres niveles de riego, 25, 50 y 90% de la diferencia entre ETo y las PP medias, encuentran que la magnitud de dicha superioridad es de 22, 15 y 51% respectivamente, sobre el testigo realizado en secano. Además, sostienen que el consumo de agua se incrementa a medida que aumenta la disponibilidad hídrica desde el secano al tratamiento que cubrió el 90% de las necesidades hídricas del cultivo, lo cual es importante pues el incremento del consumo de agua se relaciona de manera positiva con el aumento de rendimiento, explicado en un 96% por un NG mayor al aumentar la lámina de riego aplicada. Por otro lado, Zampedri y Currie (2000) en ensayos realizados en Corrientes, Argentina, obtienen un rendimiento superior en la parcela regada con respecto a la no

regada, en un 48%, quienes concluyen además que el riego, aún en pequeñas dosis, en momentos de estrés hídrico incide favorablemente en los rendimientos.

En lo que respecta a los antecedentes del riego suplementario en Uruguay, Montoya et al. (2017) en sus estudios realizados en Salto, encuentran que la magnitud de superioridad del riego con respecto al secano, es de 65%. Dentro de esta estrategia de riego, la que obtuvo mejor efecto se basa en proporcionar el 75% de los requerimientos de agua del cultivo en las etapas más sensibles a las deficiencias hídricas, R1 a R8, y contando con el aporte de las lluvias en etapas vegetativas. Por otra parte, Otero y García (2017) sostienen que el uso de riego suplementario en soja, ha permitido aumentos de rendimientos que, dependiendo de la fecha de siembra y del GM, se encuentra en el entorno del 60% con respecto al secano. Estos autores, destacan que los GM cortos logran mejores resultados frente a los GM de ciclo más largo.

En la implementación del riego suplementario, es importante definir si el objetivo es maximizar la producción o maximizar la rentabilidad del sistema. En el primer caso, se deberá mantener el AD por encima del umbral crítico, 40% AD en etapas no críticas (ENC) y 60% durante PC, para asegurar que se cubran los requerimientos hídricos del cultivo durante todo el ciclo. En cambio, en la segunda opción, se priorizará la conservación de la humedad del suelo sólo en el período de mayor susceptibilidad a las deficiencias hídricas, es decir, durante el PC, sin permitir que el agua útil del suelo se ubique por debajo del 30% en ningún momento del resto del ciclo. Es mediante esta segunda opción que es posible el aumento de la superficie regada, aumentando la EUA (Andriani, 1997).

2.5.3 Riego deficitario

En un principio la estrategia comúnmente utilizada se basaba en satisfacer completamente la demanda evaporativa del cultivo durante todo el ciclo. Esta práctica está siendo cuestionada por el elevado volumen de agua que requiere y por lo tanto se buscan estrategias que disminuyan su uso (Feres y Soriano, 2007). En zonas donde el agua pasa a ser un factor limitante, el RD entra como una opción firme (Sincik et al., 2008). El RD es una estrategia de riego mediante la cual, el volumen de agua aplicado se reduce a una fracción de la ETc. En esta estrategia se permite mantener el cultivo con un cierto grado de déficit hídrico y en consecuencia una reducción del rendimiento (García-Tejero et al., 2011). Según Kirda (2002) la pérdida de rendimiento no es

significativa teniendo en cuenta la posibilidad de ahorrar agua que brinda esta alternativa.

El RD es una estrategia que se caracteriza por permitir momentos de déficit hídrico, basado en la sensibilidad diferencial del cultivo en las diferentes etapas del ciclo a la falta de agua. La magnitud del efecto de la ocurrencia de deficiencias hídricas, en el rendimiento, depende del momento del ciclo en el cual ocurren (Fererres y Villalobos, 2016).

El objetivo principal de esta alternativa de riego es aumentar la EUA del cultivo, eliminando riegos que tienen poco impacto en el rendimiento (Kirda, 2002) aumentando la producción por unidad de agua de riego aplicada (Reddy, 2016). A su vez, mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes mediante la promoción de los mismos luego de un periodo corto de déficit hídrico (Chai et al., 2016), logrando reducir la variabilidad año a año en el rendimiento (Sincik et al., 2008). Por lo tanto, es una estrategia que permite aumentar el ingreso agrícola (Reddy, 2016).

Según Bustomi Rosadi et al. (2007), aplicar el RD en la etapa vegetativa permite alcanzar un rendimiento óptimo. Esta aseveración coincide con lo expresado por Adeboye et al. (2015), quienes encontraron que, a pesar de que el RD disminuye el crecimiento de la biomasa, la productividad del agua aumenta al eliminar el riego en la etapa vegetativa donde se registran los mayores valores de evapotranspiración por pérdida de agua desde el suelo. En cambio, aplicarlo en etapas reproductivas disminuye el rendimiento (Chai et al., 2016).

La adopción de esta estrategia de riego implica conocer el cultivo, más precisamente: la ETc, el PC de determinación de rendimiento y en qué momento se produce, la respuesta frente a la falta de agua y cuál es el impacto en la reducción del rendimiento (García-Tejero et al., 2011). Es importante también tener en cuenta la CAAD, suelos profundos permiten que el cultivo tenga más tiempo para adaptarse al bajo nivel de agua en suelo y por lo tanto no se vea afectado por el mismo (Kirda, 2002).

2.5.3.1 Estrategias de riego deficitario

Según García-Tejero et al. (2011) existen diferentes formas de aplicar el RD en función de cómo se aplica la restricción. Los autores señalan cuatro alternativas: riego deficitario regulado, sostenible, de baja frecuencia y por último riego deficitario mediante secado parcial de la zona de raíz. El riego

deficitario regulado (controlado) consta en aplicar diferentes grados de deficiencias hídricas en función del estado fenológico del cultivo. La base de esta alternativa es permitir las restricciones durante periodos no críticos, teniendo en cuenta el límite de deficiencia que puede soportar el cultivo en dichas etapas antes de retrasar su desarrollo. El riego deficitario sostenible se basa en mantener una restricción uniforme dependiendo de la demanda del cultivo. Otra de las alternativas se realiza mediante la aplicación de ciclos de restricción de riego (dentro de un rango de tolerancia) dejando secar el suelo, conocida como riego deficitario de baja frecuencia y depende del monitoreo continuo de la disponibilidad de agua del cultivo. Por último, la alternativa de riego deficitario mediante secado parcial de la zona de raíz, la cual se basa en regar la mitad de la zona radicular dejando el resto seco en cualquier periodo. De esta forma se alternan periodos de secado y humedecimiento en la zona radicular.

Seleccionar la estrategia de riego adecuada permite maximizar la utilización del agua, considerando que en la mayoría de los casos dicho recurso es uno de los factores más limitantes de la producción, manejarlo de manera eficiente puede ser una vía de mayor rentabilidad (García-Tejero et al., 2011).

2.5.3.2 Riego deficitario en soja

Los cultivos que responden positivamente a déficits hídricos moderados son adecuados para aplicar programas de RD, los cuales permiten disminuir el uso de agua de riego y a su vez mantener el rendimiento. La soja se produce principalmente en condiciones de secano, por lo tanto, la probabilidad de usar RD es limitada, sin embargo, es un cultivo con marcada sensibilidad al déficit hídrico, principalmente en etapas claves del ciclo (Ferreles y Villalobos, 2016).

Sincik et al. (2008), Candogan et al. (2013) en ensayos, realizados en Turquía, en soja bajo diferentes niveles de RD (25, 50 y 75% de la ETC) riego completo y secano, durante los años 2005 y 2006, encuentran que a medida que el riego disminuye en los tratamientos evaluados, tanto el crecimiento de las plantas como la producción de biomasa experimentaron una leve disminución. Dichos autores, también reportan el efecto del riego, pues al comparar el tratamiento no regado con los demás, todos lograron superarlo en rendimiento, el secano obtuvo un rendimiento 45% inferior al tratamiento sin deficiencias hídricas. En lo que respecta a los tratamientos bajo RD, los mismos obtuvieron un rendimiento inferior, en el entorno de 12 a 27% del tratamiento con riego completo, a medida que el riego disminuyó, pasando por 25% RD, 50% RD a 75% RD.

Por el contrario, Prieto Angueira et al. (2012) en ensayos llevados a cabo en Santiago del Estero, Argentina, en soja bajo diferentes variantes de RD, que consistieron en la reposición del 100, 75, 50, 25 y 0% de la evapotranspiración del cultivo, obtienen que el rendimiento no disminuye significativamente cuando se cubre el 75 y 50% de la evapotranspiración respecto a reponer el 100%. Al considerar, además del rendimiento, la ETc aj, se destaca el tratamiento regado con 25% de RD (75% de la evapotranspiración), ya que a pesar de que tanto el riego como la ETc aj fueron menores, el rendimiento fue igual al tratamiento sin limitantes hídricas, y significativamente superior al resto de los tratamientos. Estos resultados demuestran que es factible mantener niveles de producción utilizando un volumen de agua de riego menor.

2.5.4 Riego deficitario controlado en soja

Dentro de las estrategias de programación de riego que permiten un uso más racional del agua, se encuentra la estrategia de RDC, la cual consiste en exponer al cultivo a un nivel determinado de déficit hídrico durante una etapa del ciclo de desarrollo, sin causar disminuciones significativas en el rendimiento (Kirda, 2002).

Neyshabouri y Hatfield (1986) en ensayos realizados en soja, encontraron que el tratamiento con riego en el periodo reproductivo (RR) obtiene un rendimiento significativamente superior al tratamiento que recibió riego en la etapa vegetativa (RV), debido a que el tratamiento RR logró mejorar la EUA a través de reducir las pérdidas de agua desde el suelo por evaporación al ser regado cuando el suelo estaba cubierto. Por lo tanto, concluyen que retrasar el primer riego sería beneficioso en la pérdida de agua debido a la evaporación del suelo.

Eck et al., citados por Chai et al. (2016) sostienen que en el sur de EE.UU. el estrés hídrico en soja redujo su rendimiento en un rango de 9 a 13% cuando el déficit se ubicó durante la floración y en el entorno de 45% cuando las limitantes fueron durante el desarrollo de las vainas, al compararlo con el testigo sin limitantes hídricas durante todo el ciclo.

En ensayos en soja realizados en Turquía, con el objetivo de evaluar los efectos de la estrategia de riego, Candogan y Yazgan (2016) llevaron a cabo un experimento que consistió en un tratamiento no regado y trece tratamientos de riego diferentes (uno de riego completo y doce de RDC). Los tratamientos de

RDC se diferenciaron tanto en el volumen de riego (75, 50, 25% del agotamiento del agua del suelo) como en la etapa del ciclo en la cual se aplicó (vegetativa, floración, formación de vainas, formación de semillas). Cabe destacar que cada tratamiento de RDC fuera de la etapa en la cual se le aplicó el riego deficitario, no presentó deficiencias hídricas, es decir recibió riego completo. Los autores encontraron que el mayor rendimiento lo obtuvo el tratamiento con riego completo (4004 kg ha^{-1}), tratamiento que no tuvo diferencias significativas con el rendimiento de RDC 75% en vegetativo y el RDC 50% en vegetativo. A diferencia de esos tratamientos, el rendimiento se redujo significativamente cuando se aplicó RDC durante la floración, la formación de vainas o el llenado de granos. Como resultado, afirman que el riego completo es la mejor opción para maximizar el rendimiento, pero en zonas donde el costo del agua es alto o el recurso es escaso, disminuir el riego en la etapa vegetativa, es una alternativa mediante la cual es posible el ahorro de agua sin sacrificar rendimiento.

En Uruguay, Giménez (2014a), Giménez et al. (2014b) llevaron a cabo ensayos durante 2009-10 y 2010-11 en Paysandú, con el objetivo de medir los efectos de las deficiencias hídricas en diferentes etapas del ciclo de desarrollo. Ellos encontraron que la soja con bienestar hídrico, obtiene un rendimiento que supera los valores promedios para el país, 7275 kg ha^{-1} , cabe destacar que este resultado se obtuvo en un año "Niña". En cambio, provocar deficiencias hídricas durante el PC trajo aparejado una disminución del rendimiento en el orden de 44 y 50% y que pasan a ser de 23% cuando la falta de agua ocurre en ENC previas al PC, por lo que se destacó la susceptibilidad a las deficiencias hídricas durante el PC. En ambos casos, se obtuvo una disminución en la producción de MS pero que no tuvo efecto significativo en el NG, cuando las deficiencias ocurren en ENC previas al PC. Se determinó, además, que las deficiencias durante la etapa vegetativa no tuvieron efecto importante y a pesar de que la floración es una etapa de mayor susceptibilidad con respecto a esta, las deficiencias en este momento tampoco tuvieron efecto significativo, pues no es la etapa de mayor importancia en la determinación de rendimiento en soja. En el caso de deficiencias hídricas ocurridas durante la etapa vegetativa y el PC, se observó que el rendimiento disminuyó con respecto al riego completo en el entorno de 34 a 40%. Se destacó que estas pérdidas fueron menores a las que experimentó la soja cuando las limitantes ocurrieron en el PC, lo cual se explica por una menor competencia entre plantas durante el PC.

Foster y Rovegno (2015) indican que en ensayos efectuados en Paysandú encontraron que el tratamiento con bienestar hídrico en todo el ciclo tuvo un rendimiento de 4600 kg ha^{-1} , las deficiencias hídricas provocadas en la fase vegetativa y en la floración redujeron un 35% el rendimiento obtenido, mientras que deficiencias hídricas provocadas en la fase vegetativa causaron

una pérdida de rendimiento del 15%. El tratamiento de RD que fue regado con el 50% de la lámina de riego del BH (RD50%BH) no presentó diferencias con el BH, teniendo en cuenta que el ensayo se desarrolló en un año con lluvias por encima de la media histórica en todo el ciclo del cultivo, y una RS por debajo de la misma.

Capurro (2016), Capurro et al. (2017) durante la zafra 2015-16 llevaron a cabo ensayos en soja bajo diferentes modalidades de riego en las localidades de La Estanzuela y Las Brujas. Los tratamientos evaluados fueron: riego completo (100%) tomado como testigo, dos variantes de RD (75% y 50% de la ETc) y dos tratamientos de RDC con la reposición del 50% de la ETc, uno durante siembra a R3 y otro durante PC (50/100% y 100/50% de la ETc). Los autores encontraron que la respuesta del rendimiento en función del agua total efectiva se comportó como una función lineal plus-plateau, es decir, el riego aumenta el rendimiento hasta un volumen máximo de agua total efectiva a partir de la cual no habría aumentos de rendimiento. En este sentido, un volumen de agua total efectiva muy similar, aplicado en diferentes momentos del ciclo, tiene consecuencias en el rendimiento final, el tratamiento RDC 50/100% presentó diferencias significativas en el volumen de agua con respecto al testigo, pero obtiene un rendimiento que no se diferencia estadísticamente del mismo, los cuales logran una producción de grano de 5700 kg ha⁻¹ y 5444 kg ha⁻¹ respectivamente. Por lo tanto, los autores sugieren el RDC 50/100% como una buena estrategia de riego, ya que posibilita la utilización de un volumen de agua menor (22% respecto al testigo) sin sacrificar rendimiento, al realizar riegos deficitarios durante las etapas del ciclo con menor sensibilidad al déficit hídrico.

Friza et al. (2018) en ensayos localizados en Paysandú, reportan que el tratamiento con bienestar hídrico (BH) rindió 4900 kg ha⁻¹ y el único tratamiento que no se diferenció significativamente del mismo fue el tratamiento RD50%BH, encontrando así, una estrategia de riego mediante la cual es posible obtener el mismo rendimiento que con el BH durante todo el ciclo, y a su vez ahorrar 45% de agua de riego. Sin embargo, no es posible afirmar que este comportamiento productivo se mantenga entre años debido a las elevadas PP ocurridas durante el PC. Las estrategias de RDC disminuyeron el rendimiento respecto al BH en función de la etapa en que se produjeron las deficiencias hídricas y la intensidad de las mismas, el RDC durante PC y el RDC durante vegetativa y PC rindieron un 33 y 39% menos respectivamente que el BH, sin diferencias significativas entre ellos. El tratamiento con RDC en etapa reproductiva, obtuvo un rendimiento 23% inferior al BH, y no se diferenció de los tratamientos RDC PC y RD50%BH.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El experimento fue llevado a cabo en la zafra 2016-17 en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (EEMAC) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la UdelaR, ubicada en el km 363 de la ruta 3, departamento de Paysandú, Uruguay (32°23´ S 58°03´ W).

El tipo de suelo en el que se instaló este ensayo es un Brunosol subéutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel, formación Fray Bentos, según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay.

Cuadro 1. Características hidrológicas principales del suelo.

Horizonte	Profundidad (cm)	DAP (g/cm ³)	CC (mm)	PMP (mm)	CAAD (mm)
A	0-20	1.25	54	28	26
B	20-70	1.34	235	150	85
AB	0-70		289	178	111

DAP= densidad aparente, CC= capacidad de campo, PMP= punto de marchitez permanente, CAAD= capacidad de almacenaje de agua disponible (AD).

3.2 MANEJO DEL EXPERIMENTO

La preparación de suelos para la instalación del ensayo comenzó en el mes de julio con el laboreo primario realizado con excéntrica y el secundario con rastra de dientes, la misma operación de laboreo se realizó en octubre.

El ensayo fue sembrado el 7 de noviembre de 2016 y constó de 15 parcelas (unidades experimentales) organizadas en 5 parcelas por bloque (3 bloques), cada una de 5 m de largo y 2 m de ancho. La distancia entre hileras empleada fue de 0,4 m, como se representa en la figura 1. La densidad de siembra utilizada fue de 350.000 plantas por ha⁻¹, la cual fue lograda adecuadamente (raleo manual de plantas en V2). El cultivar utilizado fue DM 4915, caracterizado dentro del GM IV largo, con un hábito de crecimiento indeterminado.

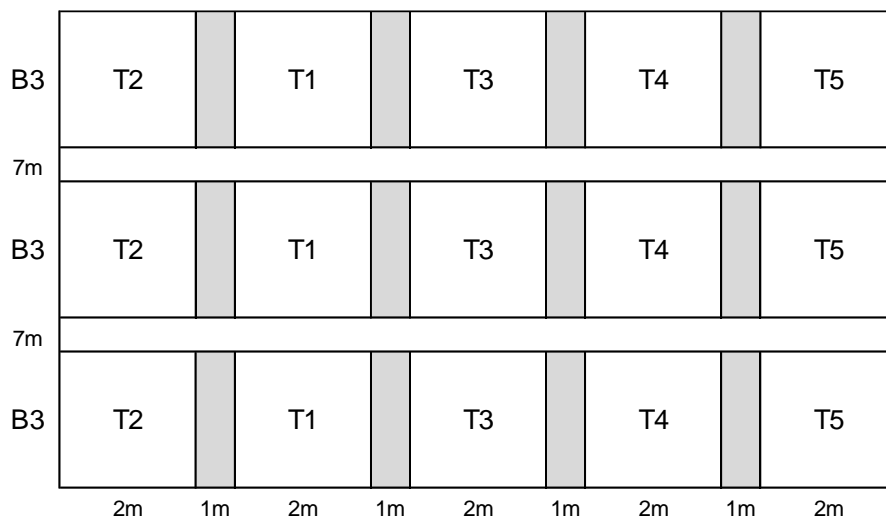


Figura 1. Croquis del experimento.

En lo que respecta a nutrición, el suelo se fertilizó con sulfato de calcio, buscando corregir una deficiencia de azufre constatada en el análisis de suelo. Para el control de malezas se hicieron dos aplicaciones de glifosato de 2 L ha⁻¹ cada una.

Se realizó el seguimiento del crecimiento y desarrollo del cultivo, con mediciones de altura y estado fenológico de las plantas. En el cuadro 2 se muestra como fue la evolución de los estados fenológicos en este experimento.

Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos del cultivo.

Fecha	Estado fenológico	DPE
7/11/2016	siembra	
15/11/2016	emergencia	0
1/12/2016	V2	16
13/12/2016	V5	28
19/12/2016	V7	34
28/12/2016	R1	43
5/1/2017	R2	51
11/1/2017	R3	57
25/1/2017	R4	71
29/1/2017	R5	75
17/2/2017	R6	94
20/3/2017	R7	125
27/3/2017	R8	132
29/3/2017	cosecha	134

DPE: días post emergencia

Nota: el periodo crítico se encuentra resaltado.

3.2.1 Tratamientos

Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

BH: bienestar hídrico en todo el ciclo.

RDC PC: riego deficitario controlado en PC.

RDC Veg+PC: riego deficitario controlado en vegetativo y PC.

RDC R3-R6: riego deficitario controlado entre R3-R6.

RD: riego deficitario (50% del riego de BH) en todo el ciclo.

Por PC, se consideró el periodo comprendido entre los estadios ontogénicos R4 y R6, por tanto, los demás estadios del cultivo, tanto anteriores como posteriores, que no pertenezcan a este periodo serán denominados ENC.

Se consideró bienestar hídrico de las ENC del cultivo cuando el contenido de AD en el suelo fue mayor o igual a 40%, y durante el PC mayor o igual a 60%, entendiéndose por deficiencias hídricas cuando el cultivo no llegó

a los umbrales hídricos mencionados. El BH fue considerado el tratamiento testigo debido a que en todo el ciclo se mantuvo por encima de dichos umbrales. El RD se caracterizó por ser regado con el 50% del agua utilizada en el BH, por tanto, en cada decisión de riego del tratamiento BH, también se regó el RD y en este caso con la mitad de la lámina de riego utilizada en BH.

Para los casos de los tratamientos en que se realizó RDC, los mismos fueron regados en las etapas que indica el nombre de cada tratamiento (PC, vegetativo y PC y R3-R6), presentando deficiencias hídricas en el resto de su ciclo fuera de las etapas mencionadas, debido a la falta de riego y a la interceptación de las PP. Para interceptar las PP, fueron utilizados simuladores de sequía parcelarios, los cuales constan de estructuras de acero cubiertas con lonas impermeables, de 5 m de longitud y 2 m de ancho, ajustándose al tamaño de las parcelas, y con una altura aproximada de 1,50 m. La metodología experimental incluyó la utilización de pronósticos meteorológicos de corto plazo para colocar los simuladores inmediatamente antes de cada evento de lluvia y extraerlos inmediatamente luego del mismo, intentando no modificar significativamente las condiciones de RS y temperatura.

Para la planificación del riego se estimó un balance hídrico, el cual tiene en cuenta las ganancias de agua al suelo (PP efectivas y riego efectivo) y las pérdidas (ETc para el tratamiento BH y ETc aj para RD y todos los tratamientos de RDC). Cabe destacar que, a efectos de este experimento, de las PP totales sólo se consideraron las efectivas, es decir aquellas que ingresaron al suelo de acuerdo a la CC y al contenido de agua que tuvo el mismo al momento de ocurrir el evento de PP. Asimismo, en lo que respecta al riego, se consideró como riego efectivo al 90% del riego nominal, característico del método de riego empleado (riego localizado, por goteo). En relación a esto, el caudal de riego de los goteros fue de $1,49 \text{ L hs}^{-1}$, los cuales se encuentran distanciados a 0,2 m.

3.3 DETERMINACIONES EFECTUADAS

Se determinó la TCC en el PC, para ello se llevaron a cabo dos muestreos de MS, estos fueron en R4 y en R6, es decir a inicios y al final del PC, respectivamente. Los muestreos de MS consistieron en el corte al ras del suelo de un metro lineal de plantas, evitando la primera y quinta hilera con la finalidad de considerar el efecto borde. Las plantas de los muestreos fueron secadas en estufas hasta peso constante, para determinar la MS. De esa manera se calculó la TCC en el PC, por la diferencia entre pesos de los muestreos y la duración del PC.

La cosecha se llevó a cabo el 29 de marzo de 2017, a través de la cosecha de 8 metros lineales de plantas ubicadas en las tres hileras centrales de cada parcela experimental. Adicionalmente se muestreó un metro lineal de plantas de la hilera central, con el objetivo de medir el número de ramas por planta, el número de nudos fértiles, el número de vainas por nudo y granos por vaina. A partir de estas mediciones se estimó el NG. El PMG y el rendimiento se estimó a partir de los nueve metros lineales de plantas cosechados.

3.4 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.4.1 Hipótesis biológica

La utilización de las estrategias de riego en soja: RD 50%, RDC PC, RDC Veg+PC y RDC R3-R6, permiten obtener rendimientos que no presentan diferencias significativas con el BH durante todo el ciclo, por tanto, la utilización de las estrategias RD y RDC evaluadas, incrementan la eficiencia de uso del agua en relación al BH.

3.4.2 Diseño experimental

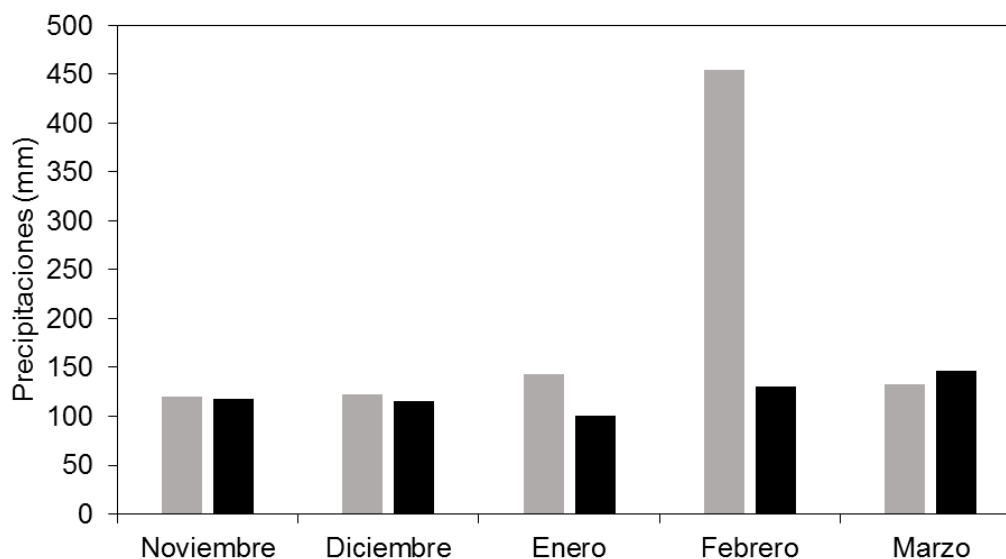
El diseño utilizado fue de bloques completos al azar, donde se utilizaron los cinco tratamientos detallados con tres repeticiones.

3.5 CONDICIONES CLIMÁTICAS DURANTE EL EXPERIMENTO

3.5.1 Precipitaciones, radiación solar incidente y temperatura

En la figura 2 se muestra las PP mensuales que se registraron entre los meses de noviembre y marzo, comparado con los promedios mensuales de la serie histórica 1961-1990, para la localidad de Paysandú (datos proporcionados por INUMET). Los datos de las PP del año agrícola 2016-17 fueron

proporcionados por la estación meteorológica automática de la EEMAC (Vantage Pro, Davis).



Barras grises= precipitaciones 2016-17; barras negras= precipitaciones 1961-1990.

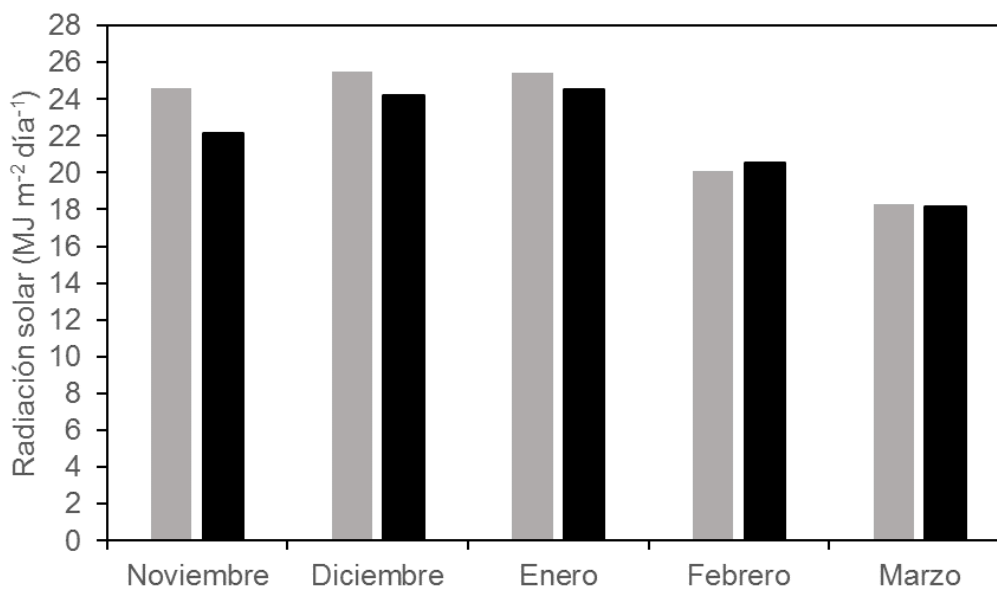
Figura 2. Precipitaciones (mm) durante el 2016-17 y valores promedio de la serie histórica 1961-1990.

Fuente: elaborado con datos proporcionados por INUMET¹ y la FA. EEMAC²

En las figuras 3 y 4, se muestra la RS incidente y la temperatura media diaria respectivamente, para los meses en los que fue llevado a cabo el experimento.

¹ INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2017. Precipitaciones. (sin publicar).

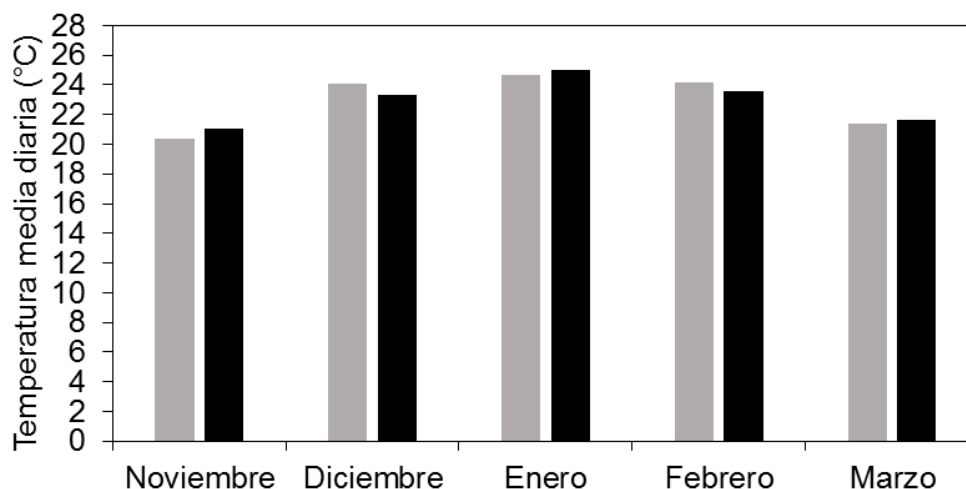
² FA. EEMAC. Estación experimental. 2017. Normales climatológicas. (sin publicar).



Barras grises= radiación solar incidente durante 2016-17; barras negras= radiación solar incidente promedio durante 2002-2015.

Figura 3. Radiación solar incidente (MJ m⁻² día⁻¹) durante el 2016-17 y valores promedio del periodo 2002-2015.

Fuente: elaborado con datos proporcionados por la FA. EEMAC²



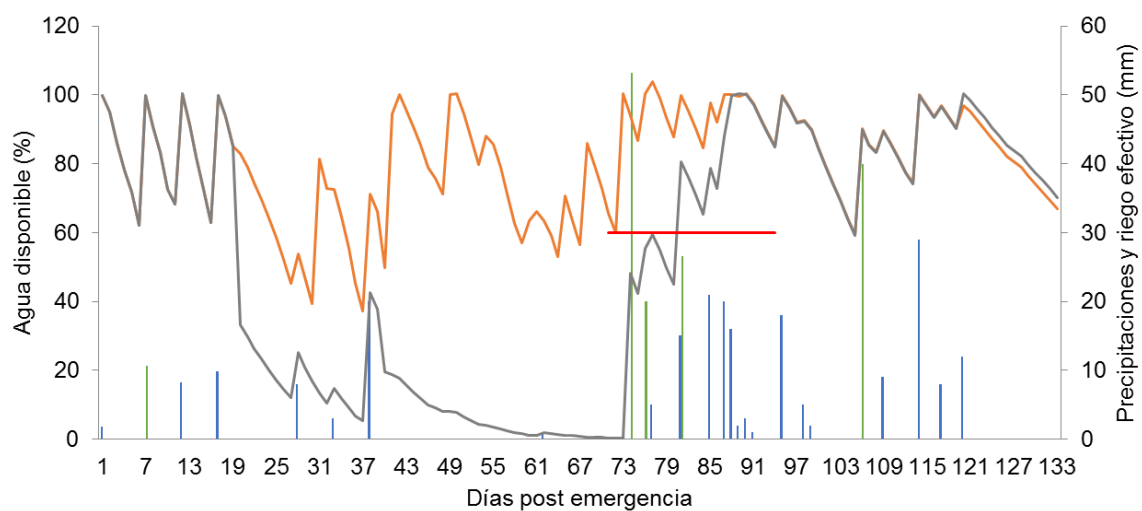
Barras grises= temperatura media diaria para 2016-17; barras negras= temperatura media diaria promedio para 2002-2015.

Figura 4. Temperatura media diaria (°C) para 2016-17 y valores promedio del periodo 2002-2015.

Fuente: elaborado con datos proporcionados por la FA. EEMAC²

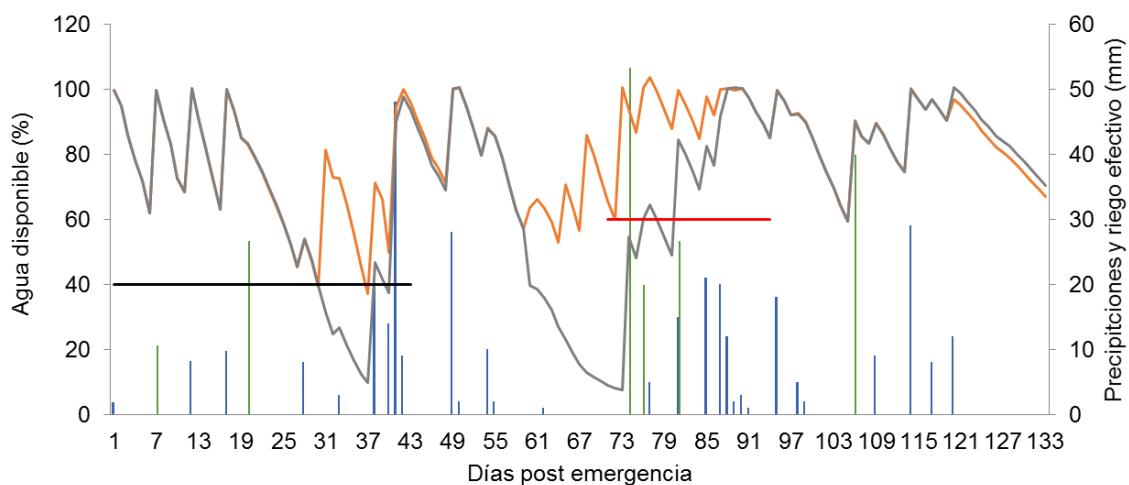
3.6 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO EN EL SUELO PARA LOS TRATAMIENTOS

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se muestra la evolución del porcentaje de AD para cada tratamiento en comparación con el tratamiento testigo (BH). Además, las mismas reflejan según sea el momento del ciclo en el que se aplicó el riego dependiendo de cada tratamiento, los umbrales de riego, así como también los volúmenes y días post emergencia de las PP efectivas y los riegos efectivos.



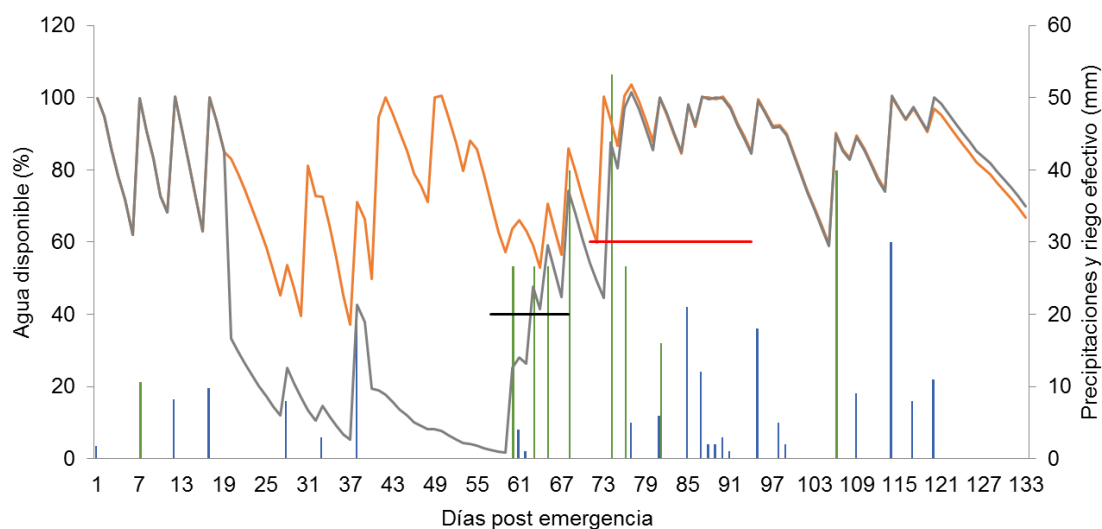
En el eje vertical primario se graficó la línea naranja que representa el tratamiento BH y la gris al tratamiento RDC PC, mientras que en el eje vertical secundario las columnas azules representan las precipitaciones efectivas y las verdes el riego efectivo. La línea roja indica el umbral de riego para el periodo crítico (60% AD).

Figura 5. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario controlado en periodo crítico (RDC PC) en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).



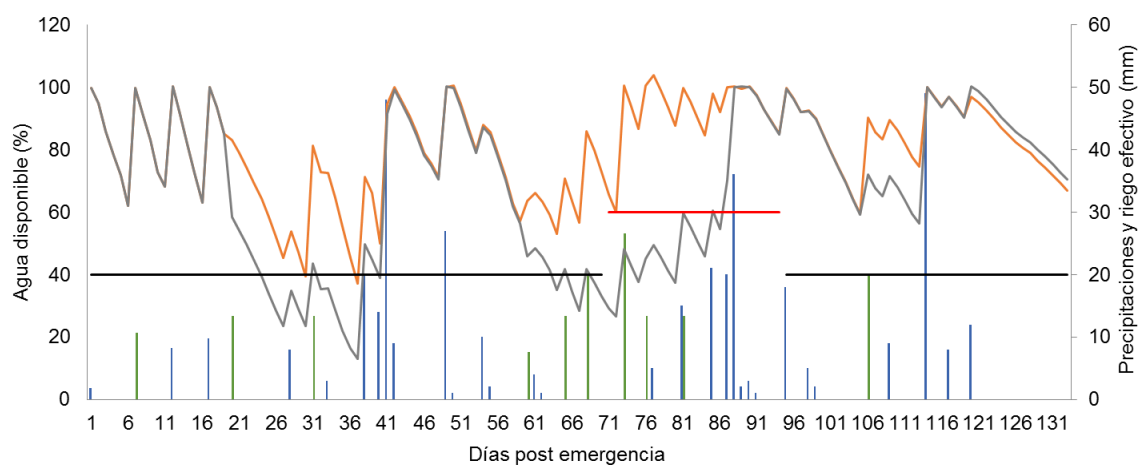
En el eje vertical primario se graficó la línea naranja que representa el tratamiento BH y la gris al tratamiento RDC Veg+PC, mientras que en el eje vertical secundario las columnas azules representan las precipitaciones efectivas y las verdes el riego efectivo. La línea negra indica el umbral de riego para las etapas no críticas (40% AD) y la línea roja indica el umbral de riego para el periodo crítico (60% AD).

Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario controlado en vegetativo y periodo crítico (RDC Veg+PC) en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).



En el eje vertical primario se graficó la línea naranja que representa el tratamiento BH y la gris al tratamiento RDC R3-R6, mientras que en el eje vertical secundario las columnas azules representan las precipitaciones efectivas y las verdes el riego efectivo. La línea negra indica el umbral de riego para las etapas no críticas (40% AD) y la línea roja indica el umbral de riego para el periodo crítico (60% AD).

Figura 7. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario controlado (RDC) en R3-R6 en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).



En el eje vertical primario se graficó la línea naranja que representa el tratamiento BH y la gris al tratamiento RD, mientras que en el eje vertical secundario las columnas azules representan las precipitaciones efectivas y las verdes el riego efectivo. La línea negra indica el umbral de riego para las etapas no críticas (40% AD) y la línea roja indica el umbral de riego para el periodo crítico (60% AD).

Figura 8. Evolución del porcentaje de agua disponible (AD) en el tratamiento riego deficitario (RD) en comparación con el tratamiento bienestar hídrico (BH).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL EXPERIMENTO

En la figura 2 se observa que en los meses de noviembre y diciembre las PP presentaron valores similares al promedio histórico, mientras que en los meses de enero y febrero las PP estuvieron por encima de la media en 43% y 247% respectivamente. Este excesivo nivel de precipitaciones en el mes de febrero se debió a que el día 12 del mes se registraron 300 mm aproximadamente. El mes que presentó niveles inferiores a la media fue marzo en el que las PP estuvieron 10% por debajo de la media histórica. Las PP totales entre noviembre y marzo del año agrícola 2016-17 fueron 60% superiores a la media, totalizando 973 mm. No obstante, gran parte de estas PP se explicó por el excesivo aporte de lluvias en el mes de febrero.

En la figura 3 se observan los valores de RS incidente diaria promedio durante los meses en los que se desarrolló el ensayo, comparado con la serie histórica 2002-2015. La RS de noviembre, diciembre y enero estuvo por encima de la media en un 11%, 5% y 4% mensual respectivamente, mientras que en los meses de febrero y marzo se presentaron valores similares a la media histórica considerada, estando febrero 2% por debajo de la media. El 11% de la RS incidente superior de noviembre se debió a que el 53% de las PP se registraron en un solo día. Cabe destacar que la RS incidente en todo el ciclo se ubicó 4% por encima de la media histórica, totalizando 3077 MJ m⁻².

En lo que respecta a las temperaturas medias mensuales, la figura 4 muestra que fueron similares a la media histórica de la serie 2002-2015.

4.1.1 Condiciones climáticas durante el periodo crítico

En el cuadro 2 se muestra que el PC transcurrió entre el 25 de enero y el 17 de febrero del 2017. El mismo se caracterizó por presentar 397 mm de PP, de los cuales 297 mm se registraron en un solo día, escurriendo una proporción importante hacia zonas más bajas del campo sin afectar al experimento.

En lo que respecta a la RS incidente diaria, el PC presentó en promedio $19,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y en cuanto a la temperatura, los valores se ubicaron en 17,9, 23,3 y 29,4 °C para las temperaturas mínimas, medias y máximas respectivamente.

4.1.2 Agua disponible en el suelo para los distintos tratamientos

Todas las estrategias de riego evaluadas presentaron diferentes evoluciones de los niveles del porcentaje de AD en suelo a lo largo de su ciclo, como resultado de un manejo del agua diferente para cada una de ellas (figuras 5, 6, 7 y 8). Dichas evoluciones fueron comparadas con la evolución del porcentaje de AD en el BH, debido a que este no presentó periodos de deficiencia hídrica, por ubicarse por encima de los umbrales en todo el ciclo. Cabe destacar que la metodología experimental utilizada para la colocación de los simuladores de sequía, en algunas oportunidades no permitió cumplir con el objetivo de interceptar las PP en momentos prefijados, por lo que en algunas ocasiones se puede observar que se registraron PP en etapas que se debían interceptar.

Como se aprecia en la figura 5, el RDC PC presentó en gran parte de su ciclo un severo déficit hídrico ya que en la mayor parte de la etapa vegetativa los contenidos de AD fueron inferiores al 20%. Esta situación se agravó hasta inicio del PC llegando a estimarse valores cercanos a 0, lo cual se revirtió durante el PC con el primer riego en el día 74 del ciclo (figura 5). Con esto se logró comenzar a revertir la situación de deficiencia hídrica poco después de iniciado el PC, siendo importante debido a que las restricciones hídricas en el PC tienen un efecto directo en el rendimiento (Kantolic et al., 2003). Se infiere que el atraso en lograr el umbral prefijado a inicio del PC, se debió fundamentalmente a la dificultad de aplicar LR mayores. Con el primer riego, si bien la LR permitió alcanzar el umbral deseado, no se logró superarlo, por lo que, este objetivo, se alcanzó con riegos posteriores.

En la figura 6 se observa que el RDC Veg+PC transcurrió la mayor parte del ciclo con niveles superiores al umbral planificado. Esta estrategia presentó la mayor parte de la etapa vegetativa con un contenido de AD superior al 40%, por lo que su crecimiento no fue limitado por agua (Andrade y Sadras, 2000b). En el PC el AD se encontró, la mayor parte del tiempo, por encima del 60%, Dardanelli et al. (2003) sostienen que es en esta etapa cuando la soja es más sensible al déficit hídrico. El periodo de deficiencias hídricas más

prolongado se registró antes de comenzar el PC. Dicha situación fue revertida rápidamente poco después de comenzado el PC por el inicio del riego.

El tratamiento RDC R3-R6, se diferenció de RDC PC pues comenzó a recibir riego a comienzos de fructificación, levantando la restricción hídrica antes del PC. En ambas estrategias, la fase vegetativa se caracterizó por presentar deficiencias hídricas severas, como se observa en las figuras 5 y 6.

En el caso de RD, al compararlo con BH, ambos fueron regados para complementar el aporte de la lluvia durante todo el ciclo, sin embargo, en RD por haberse regado con el 50% de BH, durante R3,5-R5,5 ocurrieron deficiencias, como se muestra en la figura 8.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EXPERIMENTO

4.2.1 Efecto de las distintas disponibilidades hídricas en el rendimiento y sus componentes

En el cuadro 3 se presenta el rendimiento obtenido, así como los componentes del rendimiento para cada estrategia de riego evaluada.

Cuadro 3. Rendimiento en grano (kg ha^{-1}), número de granos m^{-2} y peso de 1000 granos (g) para los tratamientos.

Tratamientos	Rendimiento (kg ha^{-1})	Número de granos m^{-2}	Peso de 1000 granos (g)
BH	6798 a	4519 a	150 b
RDC PC	4764 b	2633 b	167 a
RDC Veg+PC	5956 ab	3975 ab	160 ab
RDC R3-R6	5523 b	3383 ab	154 ab
RD	6004 ab	3088 ab	162 ab

BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en período crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= RDC en R3-R6; RD= riego deficitario. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Las condiciones climáticas que caracterizaron el año agrícola 2016-17, con una RS incidente total de 3077 MJ m^{-2} y temperaturas similares a la media histórica, sumado a que los tratamientos evaluados no presentaron deficiencias

hídricas en el PC (con excepción del RD), permitieron que las etapas de definición del rendimiento se desarrollaran bajo condiciones óptimas, lo que se reflejó en los rendimientos elevados obtenidos en todas las estrategias de riego evaluadas (cuadro 3).

Dentro de las estrategias evaluadas, se destacaron el RD y el RDC Veg+PC que no se diferenciaron del BH en rendimiento, por haber tenido, en aspectos generales, tanto en la etapa vegetativa como en la reproductiva altos contenidos de AD en el suelo, acompañados por niveles de RS incidente altos. En este sentido, Canosa y Prieto (2013) obtuvieron un rendimiento de 6200 kg ha⁻¹ con una RS incidente de 3005 MJ m⁻² en todo el ciclo, así como también Giménez (2014a) reportó un rendimiento de 7275 kg ha⁻¹ con una RS incidente de 3345 MJ m⁻² en todo el ciclo³. Estos datos reflejan la importancia de la RS incidente en la producción de grano de soja, concluyendo que, para obtener rendimientos elevados, superiores a 6000 kg ha⁻¹, además de manejar el bienestar hídrico en gran parte del ciclo son necesarios niveles de RS incidente en el entorno de los 3000 MJ m⁻².

Las estrategias de RDC PC y RDC R3-R6 presentaron 30 y 19% menos rendimiento en comparación al BH respectivamente, producto de las severas deficiencias hídricas durante la etapa vegetativa y reproductiva temprana. Las deficiencias mencionadas seguramente provocaron una menor eficiencia de intercepción de la RS incidente, como expresan Andrade y Sadras (2000b), Dardanelli et al. (2003), quienes afirman que la soja sometida a deficiencias hídricas presenta disminuciones en la biomasa, explicado por la reducción en la eficiencia de intercepción de la RS y en la eficiencia de conversión. Para el tratamiento RDC PC en particular, se observa una pérdida de 2000 kg ha⁻¹ de rendimiento, lo cual coincide con lo presentado por Friza et al. (2018), quienes obtuvieron para RDC PC y con el mismo cultivar, un rendimiento 33% inferior al de BH. Si bien es conocida la importancia de la disponibilidad hídrica en el PC, como lo expresan Cárcova et al. (2003), Kantolic et al. (2003), Karam et al. (2005), Giménez y García Petillo (2011), parte del rendimiento está determinado por la condición hídrica en las ENC previas al PC, como se desprende de estos resultados en los que las deficiencias hídricas severas en las ENC fueron las que ocasionaron dicha pérdida de rendimiento.

En lo que respecta al NG (cuadro 3), se obtuvieron elevados valores en relación a los datos nacionales presentados por Giménez (2014a) quien reportó un NG de 4400 granos por m⁻² y por Friza et al. (2018) quienes obtuvieron 4163 granos por m⁻², y a los datos reportados por Canosa y Prieto (2013), Foster y Rovegno (2015) de 3348 granos por m⁻² y 2720 granos por m⁻²,

³ Giménez, L. 2019. Com. personal.

respectivamente. El RDC PC presentó el 58% de los granos con respecto al BH, siendo esta la causa de la diferencia en rendimiento entre ambas estrategias de riego, producto de haber experimentado niveles de AD bajos en el suelo a fines de la etapa vegetativa y durante la etapa reproductiva temprana. El RDC R3-R6, si bien no mostró diferencias con BH en cuanto al NG, presenta un NG menor ($p < 0.10$) seguramente, producto de las severas deficiencias hídricas ocurridas durante la etapa vegetativa y reproductiva temprana, lo que explica la diferencia de rendimiento entre ambos tratamientos.

Para el componente PMG, se obtuvieron valores acordes al valor característico de la variedad, el cual es de 161 g, siendo en este caso para el promedio de los tratamientos de 159 g (cuadro 3). El valor mayor de PMG lo logró RDC PC, siendo superior al del BH. Con respecto a esto, Kantolic et al. (2003) afirman que cuando ocurren variaciones en la fotosíntesis en el PC y el NG es reducido, durante el llenado de los granos puede aumentar la disponibilidad de asimilados por unidad de grano y como consecuencia aumentar su ritmo de crecimiento y su peso final.

4.2.1.1 Relaciones entre el rendimiento y componentes principales del rendimiento

En la figura 9 se aprecia que existió una relación lineal y positiva junto con coeficiente de determinación alto entre el NG y el rendimiento, por lo tanto, era esperable lo que se observa en el cuadro 3, a medida que aumenta el NG, el rendimiento es mayor, por lo cual este componente es considerado el más importante en definir el rendimiento, como fuera indicado por Egli (1998). Para el caso del PMG, la relación es lineal y negativa, y se registró un coeficiente de determinación menor, como se aprecia en la figura 10. En caso de tener un bajo NG, no se compensará tanto el rendimiento con un mayor peso de los mismos. Así se observa en RDC PC, el cual, por haber registrado un menor NG, obtuvo uno de los valores más altos de PMG, lo cual como era de esperar, si bien hace que aumente el rendimiento, no logra una notoria diferencia, concordando con lo expresado por Kantolic et al. (2003).

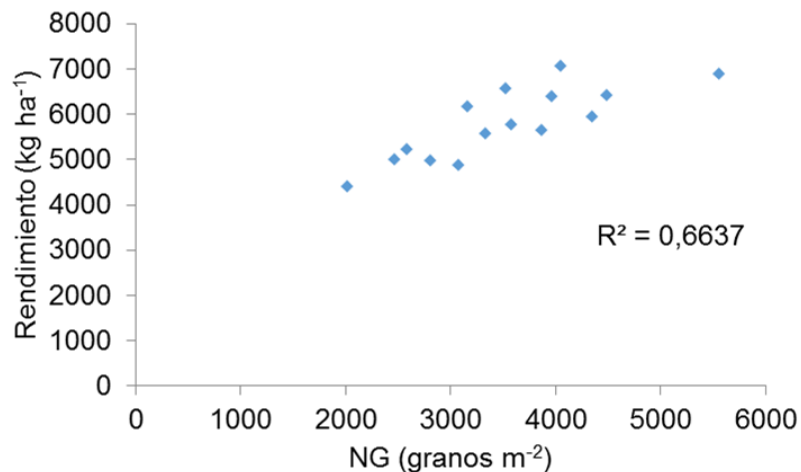


Figura 9. Relación entre rendimiento (kg ha⁻¹) y número de granos (granos por m⁻²).

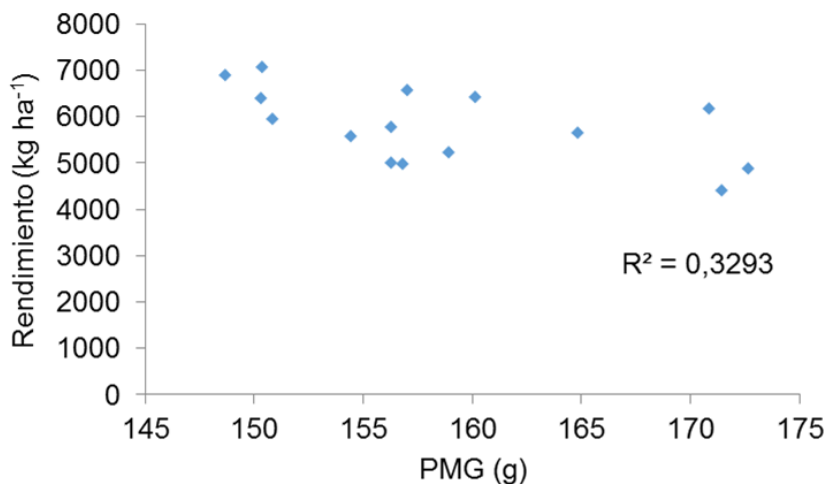


Figura 10. Relación entre rendimiento (kg ha⁻¹) y peso de mil granos (g).

En el cuadro 4 se observa que el BH es la estrategia con los valores numéricos más elevados en todos los subcomponentes evaluados, a excepción de vainas por nudo en el cual fue superado por RDC Veg+PC. En relación al subcomponente vainas por nudo, se encontró que, de las estrategias evaluadas, el RDC Veg+PC fue la que logró diferenciarse del resto por haber tenido mayor fertilidad de sus nudos, no presentando diferencias con el BH, debido a no haber atravesado deficiencias hídricas severas durante el ciclo y tener una evolución del porcentaje de AD similar al BH (figura 6).

Cuadro 4. Subcomponentes del rendimiento en los tratamientos evaluados.

Tratamientos	Vainas nudo ⁻¹	Vainas planta ⁻¹	Granos vaina ⁻¹	Granos planta ⁻¹
BH	2,6 ab	49 a	2,6 a	129 a
RDC PC	2,2 b	33 a	2,3 b	77 b
RDC Veg+PC	2,9 a	47 a	2,5 ab	119 ab
RDC R3-R6	2,3 b	41 a	2,3 b	97 ab
RD	2,4 b	36 a	2,5 ab	91 ab

BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= RDC en R3-R6; RD= riego deficitario. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En lo que respecta a la estrategia RDC PC, presentó un menor número de vainas por planta ($p < 0.10$) con respecto al BH, debido a que se situó 33% por debajo del valor del mismo, como producto de las deficiencias hídricas severas ocurridas hasta comenzar el PC. Se concluye que el subcomponente vainas por planta es afectado por la disponibilidad hídrica, un estrés hídrico durante el comienzo de la etapa de formación de las vainas, reduce el número de las mismas, disminuyendo el rendimiento final, lo cual concuerda con lo expresado por Kantolic et al. (2003).

Al analizar el subcomponente granos por vaina (cuadro 4), se observa que las estrategias con valores inferiores son RDC PC y RDC R3-R6, difiriendo del BH, que al igual que para el subcomponente vainas por planta, radica en las deficiencias hídricas ocurridas en las etapas vegetativa y reproductiva temprana. El RDC PC finalizó con un 40% menos de granos por planta que el BH, como resultado del número de vainas y granos por vaina menor. Esta diferencia del 40% persiste en el NG (cuadro 3), sin embargo, el mayor PMG en este tratamiento logró compensar un 10% el rendimiento, resultando RDC PC con un valor 30% inferior al rendimiento de BH (cuadro 3).

4.2.2 Altura de planta a R6 y nudos por planta para cada estrategia evaluada

Las estrategias BH, RDC Veg+PC y RD alcanzaron alturas de 108, 101 y 102 cm respectivamente, coincidiendo con los datos mostrados por Capurro (2016) quien obtuvo alturas de plantas de 100 a 110 cm en experimentos con riego. Estas estrategias de riego, que se encontraban en bienestar hídrico

durante la etapa vegetativa, fueron las que presentaron mayor altura de planta tanto al inicio como al final del PC. En relación a esto, se presenta la figura 11, donde se muestra la relación existente entre la altura de planta y el rendimiento, mostrando estar fuerte y positivamente relacionados en este experimento. No obstante, esta respuesta puede tener un comportamiento errático, debido a que, mientras que la altura de planta máxima se registra en R5 (Toledo, s.f.), el potencial de rendimiento se define hasta R6. Por lo tanto, la ocurrencia de condiciones limitantes posteriores a R5 pueden afectar el rendimiento, a pesar de que la altura de planta sea elevada.

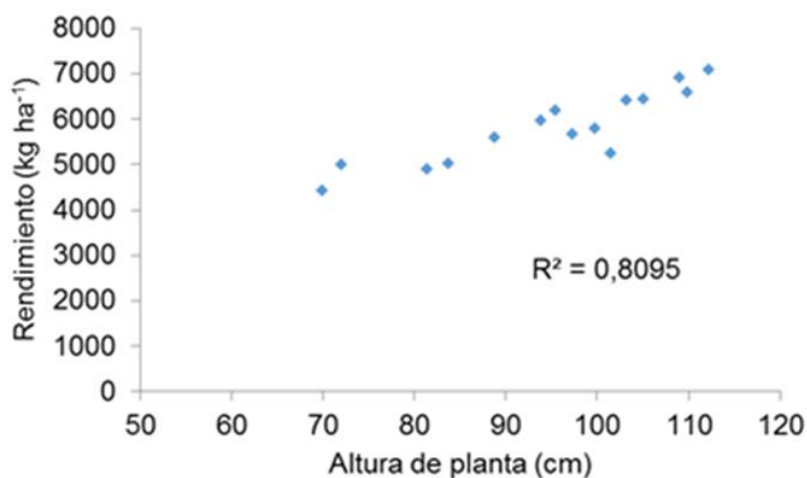


Figura 11. Relación entre altura de planta (cm) y rendimiento (kg ha⁻¹).

Como se muestra en el cuadro 5, no existieron diferencias en el número de nudos por planta entre los tratamientos evaluados. En ese sentido se concluye que ocurrió un alargamiento de los entrenudos a medida que aumentó la altura de planta, y que el aumento de rendimiento no se debió a una variación en el número de nudos por planta, sino a una combinación entre los distintos subcomponentes del rendimiento para los tratamientos que no difirieron en altura.

Cuadro 5. Altura de planta (cm) y nudos fértiles por planta para cada uno de los tratamientos evaluados.

Tratamientos	Altura a R6 (cm)	Nudos planta ⁻¹
BH	108 a	19 a
RDC PC	74 c	15 a
RDC Veg+PC	101 ab	16 a
RDC R3-R6	89 bc	18 a
RD	102 ab	15 a

BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= R0DC en R3-R6; RD= riego deficitario. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

4.2.3 Materia seca y tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico de determinación del rendimiento

En el cuadro 6 se presenta la producción de MS al inicio y al final del PC y la TCC durante dicho periodo obtenida en los tratamientos evaluados. La estrategia que se diferenció del BH en producción de MS a inicios del PC fue el RDC PC (cuadro 6), la cual obtuvo el 52% de la MS de BH, como resultado de niveles de AD bajos en el suelo previo al inicio del PC, lo que seguramente repercutió en una menor eficiencia de intercepción de la RS, provocando menor eficiencia de conversión y por tanto menor producción de biomasa. En cuanto a la MS al final del PC, RDC PC y RDC R3-R6 fueron las estrategias que obtuvieron menor producción de MS en términos numéricos, debido a que fueron las que presentaron disponibilidades hídricas menores en su ciclo. Se concluye que el comienzo del riego en R3, en RDC R3-R6, no logró generar una mayor cantidad de MS al final del PC, comparado con el tratamiento RDC PC.

Cuadro 6. Materia seca (MS, kg ha⁻¹) al inicio y al final del periodo crítico y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC, kg ha⁻¹ día⁻¹) para los diferentes tratamientos.

Tratamientos	MS al inicio del PC (kg ha ⁻¹)	MS al final del PC (kg ha ⁻¹)	TCC (kg ha ⁻¹ día ⁻¹)
BH	9009 a	15237 ab	178 a
RDC PC	4662 b	11155 c	186 a
RDC Veg+PC	7512 ab	16484 a	256 a
RDC R3-R6	5723 ab	10954 c	150 a
RD	7189 ab	12150 bc	142 a

BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= RDC en R3-R6; RD= riego deficitario. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En el cuadro 6 se observan los elevados valores de MS que se alcanzaron al final del PC para las estrategias de RDC Veg+PC y BH, similares a los resultados presentados por Giménez (2014a) en el tratamiento sin deficiencias hídricas (BH). Estos resultados están explicados básicamente por tres aspectos: la disponibilidad hídrica, la RS incidente y la temperatura. Con respecto a la disponibilidad hídrica, para las dos estrategias mencionadas, el nivel de AD en el suelo se mantuvo por encima de los umbrales prefijados en gran parte del ciclo, permitiendo mejorar la utilización de la RS incidente elevada. Esto, sumado a temperaturas promedio menores a 25 °C en todo el ciclo, seguramente logró retrasar la floración, provocando que se extienda la etapa vegetativa, como lo expresa Toledo (s.f.), quien sostiene que la temperatura puede modificar la respuesta de la soja al fotoperiodo, siendo el efecto mayor en soja de GM con menor sensibilidad.

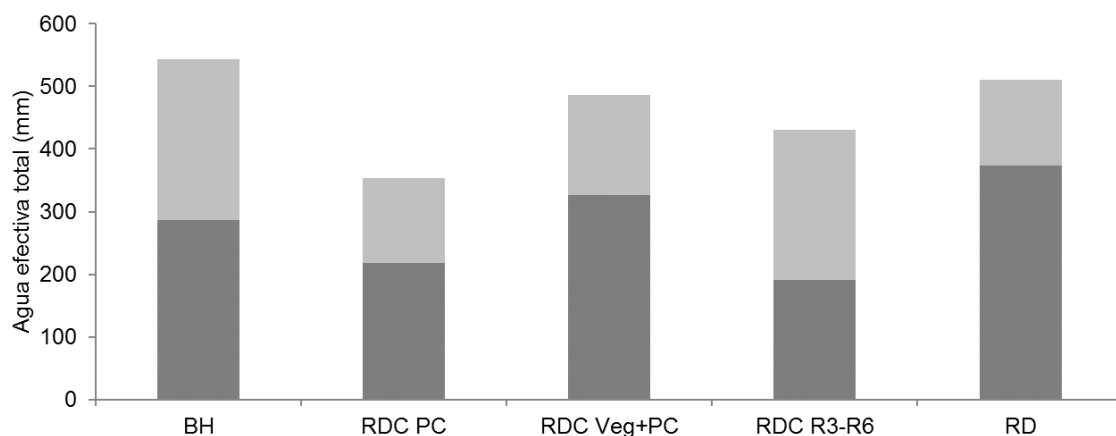
Las TCC (cuadro 6) muestran valores acordes a los máximos presentados por Baigorri (1997), quien obtuvo valores promedios entre 83 y 186 kg MS ha⁻¹ día. A nivel nacional, Friza et al. (2018) con el mismo cultivar y en el mismo sitio, obtuvieron valores de TCC para el periodo R4-R7 de 50 a 139 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ para las distintas estrategias de RD y RDC y 100 kg MS ha⁻¹ día⁻¹ para BH, no llegando a superar las obtenidas en este ensayo. Cabe destacar que esas TCC fueron medidas hasta R7, etapa en la que el cultivo de soja presenta menores TCC, lo cual explica las menores TCC registradas por Friza et al. (2018) a pesar de que se registraron mayores valores de RS incidente durante el PC con respecto a este ensayo. Los resultados presentados muestran que las estrategias RDC R3-R6 y RD presentaron valores menores con respecto al BH ($p < 0.10$). Esto pudo deberse para el caso de RDC R3-R6, a

que luego del severo déficit hídrico que sufrió hasta R3, experimentó sus mayores valores de TCC antes de iniciar el PC (a diferencia de RDC PC, el cual por iniciar el riego en R4, recién a partir de ese momento logró sus máximos valores). Para la estrategia RD, se debe a que entre los estadios R3,5-R5,5 no logró superar el umbral de AD establecido, encontrándose con estrés hídrico en dicho periodo.

4.3 EFECTO DE LA ESTRATEGIA DE RIEGO SOBRE EL CONSUMO DE AGUA

4.3.1 Agua efectiva

En la figura 12 se muestra el total de agua efectiva que recibió cada tratamiento evaluado. El primer aspecto a destacar es la relación existente entre el agua efectiva total en las distintas estrategias de riego y el rendimiento obtenido, se constató una relación directa, de manera que los tratamientos que más agua efectiva recibieron fueron los que lograron rendimientos mayores.



Barras oscuras= precipitaciones (PP) efectivas; barras claras= riego efectivo; BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= RDC en R3-R6; RD= riego deficitario.

Figura 12. Agua efectiva (mm) en cada tratamiento evaluado.

Las proporciones de riego y PP del total de agua efectiva variaron en cada tratamiento, mostrando para el caso del BH que el 53% del agua efectiva provino de las PP y el 47% restante del riego, mientras que, para el RD el 70%

representó el aporte de las PP y el 30% restante correspondió al riego. Esta diferencia se debió a que, al momento de ocurrir las PP, cada estrategia presentó un contenido de AD en el suelo diferente, mejorando el aprovechamiento de las PP a medida que el AD en el suelo fue menor. Este aspecto es importante si se lo relaciona con lo aportado por Giménez (2012) quien afirmó que la CAAD del suelo es un factor limitante y la disponibilidad hídrica depende de las recargas por parte de las PP. En este caso en particular, la CAAD del suelo, solo hubiera alcanzado para el 21% de la demanda hídrica de la soja.

4.3.2 Evapotranspiración

Los valores de ETc diaria se incrementaron desde la emergencia del cultivo y mostraron los valores máximos entre los 64 y 76 días post emergencia, momento en el cual el cultivo se encontraba en el estadio de formación de vainas, lo cual ocurrió en la segunda quincena de enero. Esto coincide con lo indicado por Cruz et al. (2000) quienes afirman que en enero se registran los valores máximos de ETo, momento también en el cual el Kc toma valores más altos por la etapa en la cual se encuentra el cultivo.

En el cuadro 7 se muestra el consumo de agua estimado a través de la ETc y ETc aj en las diferentes etapas de desarrollo y total para los tratamientos evaluados.

Cuadro 7. Evapotranspiración del cultivo (ETc) para cada etapa y total (mm) en el tratamiento de bienestar hídrico (BH) y evapotranspiración ajustada (ETc aj) por etapa y total en cada tratamiento de RD y RDC evaluados (mm).

Tratamientos	Vegetativo	R1-R4	R4-R6	R6-R8	TOTAL
BH	111	146	126	139	522
RDC PC	69	16	89	139	313
RDC Veg+PC	95	119	96	139	449
RDC R3-R6	69	73	122	139	403
RD	94	137	99	139	469

BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= RDC en R3-R6; RD= riego deficitario.

Al observar el volumen total de agua utilizado en cada estrategia de riego evaluada (cuadro 7) se puede apreciar que, como era esperable, el BH presentó el mayor consumo de agua, el cual coincide con lo expresado por Giménez (2012) quien, en experimentos llevados a cabo en la misma localidad, mostró que las necesidades de agua del cultivo se encontraron en el rango de 423 a 524 mm entre los años 2009 y 2011. Para los restantes tratamientos, el consumo de agua fue de 60, 86, 77 y 90% para RDC PC, RDC Veg+PC, RDC R3-R6 y RD respectivamente con respecto al BH, representando casi fielmente la proporción de rendimientos de dichos tratamientos con respecto al testigo.

El RDC PC fue la estrategia que presentó el consumo de agua menor por etapas (salvo de R6 a R8, momento en el que todos los tratamientos registraron la misma cantidad de ETc aj), siendo la etapa R1-R4 la que presentó el menor consumo (cuadro 6), representando el 11% de lo consumido por BH en esa etapa. Este menor consumo de agua es producto del agotamiento progresivo del AD en el suelo ya que hasta R4 el RDC PC no había sido regado. A partir de R4 el consumo de agua aumentó, no llegando a registrar los valores de BH, quizás producto de haber tenido menor cantidad de MS, y así seguramente menor superficie transpiratoria.

El consumo de agua en la etapa vegetativa para el RDC R3-R6, como era de esperar, fue el mismo que para el RDC PC, ya que ambos tratamientos en esa etapa no presentaron diferencias en riego. La diferencia entre ambos radica en que, en el RDC R3-R6, por haber comenzado el riego en una etapa anterior al PC, el consumo de agua en la etapa R1-R4 aumentó (cuadro 7), lo cual implicó 76% más de agua de riego en esta etapa con respecto al RDC PC (figura 12). Para la etapa R1-R4, el consumo de agua de RDC R3-R6 representó el 50% del consumo de agua del BH, siendo mayor al 11% registrado en RDC PC en dicho periodo, debido al comienzo anterior del riego.

En la figura 13 se muestra la relación lineal y el coeficiente de determinación alto, existente entre el agua consumida y el rendimiento obtenido, lo cual concuerda con lo ya detectado por Sincik et al. (2008), Capurro et al. (2017), quienes afirman que la reducción en rendimiento es proporcional a la reducción en la ETc.

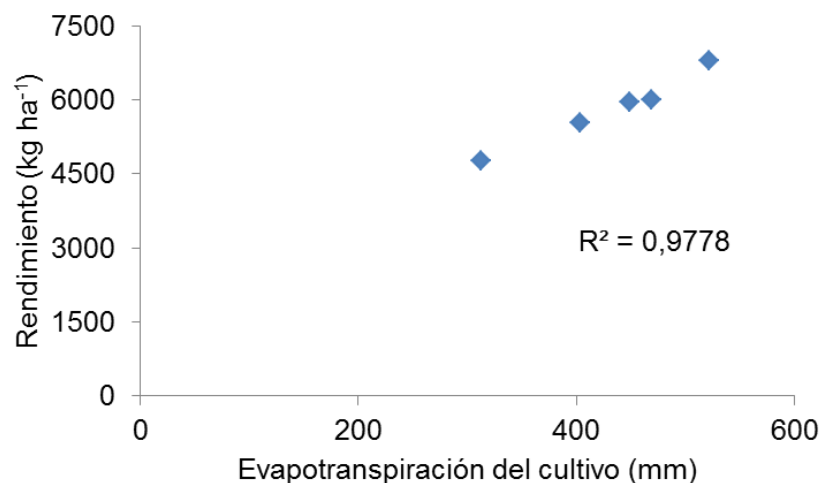
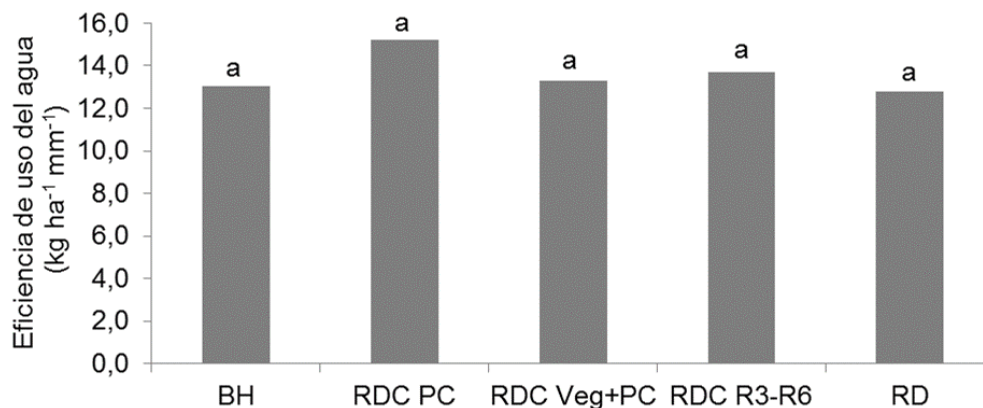


Figura 13. Relación entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c , mm) y el rendimiento para los tratamientos evaluados ($kg\ ha^{-1}$).

4.3.3 Eficiencia de uso del agua

En la figura 14 se presenta la EUA para los tratamientos evaluados. En este experimento, en el BH se logró una EUA de $13\ kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$, siendo un valor de eficiencia elevado, en relación a información nacional reciente, Capurro et al. (2017) obtuvieron $8,5\ kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$. Además, para la misma localidad, una de las máximas eficiencias registradas, la presentó Giménez (2014a), quien obtuvo una EUA de $12\ kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$, y una de las menores fue presentada por Friza et al. (2018), quienes además utilizaron el mismo cultivar, teniendo como resultado una EUA de $9\ kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$. El elevado valor de EUA obtenido en este ensayo es el resultado de un consumo de agua considerado como normal para soja, de acuerdo a lo expresado por Giménez (2012), y rendimientos elevados resultantes de un año de RS incidente alta.



Barras= eficiencia de uso del agua; BH= bienestar hídrico; RDC PC= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); RDC Veg+PC= RDC en vegetativo y PC; RDC R3-R6= RDC en R3-R6; RD= riego deficitario. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

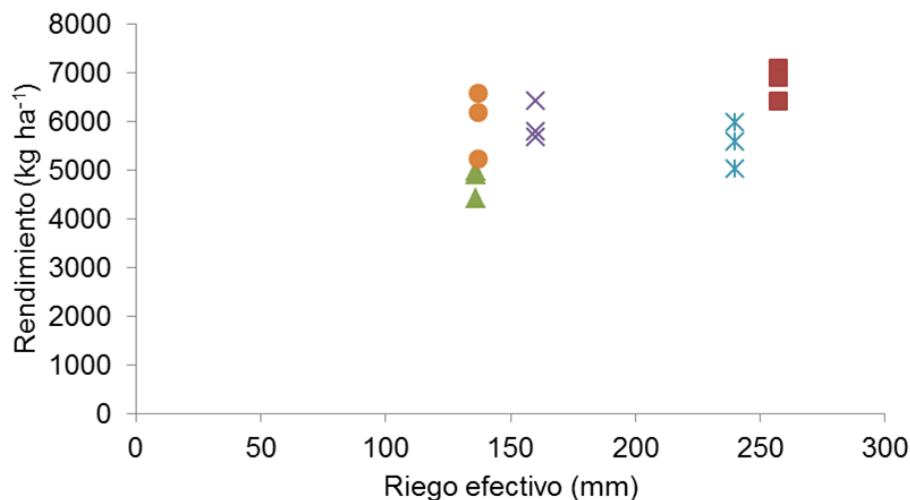
Figura 14. Eficiencia de uso del agua (EUA; $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$) para los diferentes tratamientos evaluados.

No se presentaron diferencias entre los tratamientos evaluados en relación a la EUA. Sin embargo, la estrategia RDC PC, presentó dentro de las estrategias evaluadas la mayor EUA en términos numéricos, debido a una disminución porcentual de la ET_c , importante en relación al BH producto de no haberse realizado riegos en la etapa vegetativa, en la cual las pérdidas de agua por evaporación son importantes, comenzando el riego en el PC, mostrando una alta EUA en el PC, como indicaron Bustomi Rosadi (2007), Adeboye et al. (2015).

4.4 IMPORTANCIA DE LA ESTRATEGIA DE RIEGO

En la figura 15 se observa que no existió una relación clara entre el riego efectivo y el rendimiento. Se constató que el RDC PC y RD presentaron el mismo volumen de riego, sin embargo, el RD presentó un rendimiento significativamente mayor al RDC PC y no se diferenció del BH. El RD presentó una mejor distribución del agua de riego ya que, no solo obtuvo un rendimiento mayor, sino que también permitió hacer un mejor uso de las PP con respecto a RDC PC. Esta información muestra la importancia de las etapas del cultivo en las que se utiliza el agua, más que el volumen total del mismo. El RD usando solamente el 53% de agua de riego con respecto al BH obtuvo un rendimiento igual al mismo, lo que concuerda con lo expresado por Fereres y Villalobos

(2016), quienes afirman que la estrategia de RD permite lograr buenos resultados en zonas donde el recurso hídrico es limitado.



Cuadrado rojo= bienestar hídrico; triangulo verde= riego deficitario controlado (RDC) en periodo crítico (PC); asterisco celeste= RDC en R3-R6; cruz violeta= RDC en vegetativo y PC; punto naranja= riego deficitario.

Figura 15. Relación entre riego efectivo (mm) y rendimiento (kg ha⁻¹).

La estrategia RDC PC fue la que obtuvo menor rendimiento, explicado por un menor NG, que radica en el menor número de granos por planta como producto de presentar menor número de vainas por planta ($p < 0.10$). Estos efectos en los componentes y subcomponentes del rendimiento, surgen como consecuencia del periodo de deficiencias hídricas en las ENC previas al PC, el que afectó considerablemente la producción de MS a inicios de PC, que no pudo ser compensada durante dicha etapa y finalmente repercutió en el rendimiento. La soja presenta, según Andrade et al. (2000a), buena capacidad de compensar daños causados por estrés hídrico debido a sus características morfo-fisiológicas, por lo que es caracterizada como una especie plástica. No obstante, con esta información se muestra que las deficiencias hídricas ocurridas en ENC previas al PC tienen efecto en el rendimiento, que no logra ser compensado en el PC. La estrategia de RDC en la que se consideró la ENC previa al PC, fue el RDC Veg+PC, la cual, por no permitir deficiencias hídricas en dicha etapa, no mostró diferencias en los componentes de rendimiento y por ende en el rendimiento final con respecto al BH, y se regó con el 62% del agua de BH.

La estrategia de RDC R3-R6 utilizó un volumen de agua de riego similar al de BH (figura 12), 240 mm y 257 mm respectivamente, ubicándose en el segundo lugar en términos de volumen de agua de riego recibido, probablemente por haberse regado en la etapa del año con mayores demandas atmosféricas (Cruz et al., 2000). A pesar de existir esta similitud entre ambas estrategias, el hecho de que el RDC R3-R6 experimentó deficiencias hídricas severas durante la etapa vegetativa y floración, provocó que el rendimiento fuera menor que el del BH, por lo que las deficiencias hídricas hasta R3 provocaron una diferencia de 1200 kg ha^{-1} en el rendimiento, equivalente al 19% con respecto a BH.

5. CONCLUSIONES

Se rechaza la hipótesis biológica definida, ya que se detectaron diferencias significativas en rendimiento entre estrategias de RDC evaluadas y el BH. A su vez, se constató que las estrategias de RD y RDC no pudieron incrementar la EUA, presentando valores iguales a la estrategia BH.

Se encontró que las estrategias de RDC Veg+PC y RD utilizaron un volumen de riego menor que BH (38% y 47%, respectivamente) y no presentaron diferencias en rendimiento, permitiendo así ser más eficientes en el uso del riego. No obstante, cabe aclarar que el RD es una estrategia dependiente de las PP, por lo que no es esperable un comportamiento productivo similar en condiciones de PP diferentes.

La estrategia de RDC PC obtuvo el rendimiento menor, producto de no haber podido compensar un nivel de MS bajo a inicios del PC, y a que esa afectación se trasladó al rendimiento en grano, a pesar de que el cultivo se encontró en bienestar hídrico durante el PC. Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos no es conveniente utilizar estrategias de regar sólo en el PC debido a que las deficiencias en las ENC previas al PC repercuten negativamente en el rendimiento. En base a esta información se concluye que, a la importancia de mantener la soja sin deficiencias hídricas durante el PC, por su conocida relevancia en la determinación del rendimiento, se le suma la necesidad de mantener un buen nivel hídrico en el suelo durante la etapa vegetativa, siendo RDC Veg+PC la estrategia de RDC que se posicionó mejor.

Las tres estrategias con rendimientos más elevados fueron las que presentaron mayores consumos de agua, explicado por una relación lineal y positiva entre la ETc y el rendimiento. No obstante, a que la ETc se relacionó fuertemente con el agua efectiva total, se encontró una baja relación entre el rendimiento y el riego, mostrando que, con un mismo volumen de agua de riego, se pueden obtener diferentes rendimientos, siendo la disponibilidad hídrica en las diferentes etapas de desarrollo un aspecto determinante.

En relación a las PP efectivas, se encontró que la utilización de las PP varió en función del AD en el suelo al momento de registrarse las mismas, dependiendo de la estrategia de riego y su respectivo nivel hídrico antes de las PP, siendo el BH la estrategia menos eficiente en la captación de PP.

Se sugiere continuar evaluando la estrategia de RD en años climáticamente contrastantes, teniendo en consideración que durante el PC no

se registren deficiencias hídricas, de manera de no solo utilizar un volumen de riego menor, sino también considerar la EUA.

6. RESUMEN

Se desarrolló un experimento de soja (*Glycine max, L.*) en la Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni" situada en Paysandú, Uruguay, en la temporada 2016-17. El ensayo consistió en aplicar diferentes estrategias de riego en distintas etapas del cultivo y evaluar su efecto en el rendimiento y sus componentes, así como en la producción de MS, la TCC durante el PC y la EUA. Se evaluaron 5 tratamientos en función de la estrategia de riego utilizada y el momento del ciclo del cultivo en el cual es aplicada, los mismos fueron: BH: bienestar hídrico en todo el ciclo mediante riego suplementario; RDC PC: riego deficitario controlado en PC; RDC Veg+PC: riego deficitario controlado en vegetativo y PC; RDC R3-R6: riego deficitario controlado entre R3-R6; RD: riego deficitario con el 50% del agua de riego de BH durante todo el ciclo. En los tratamientos de RDC se utilizaron simuladores de sequía para impedir la interceptación de las PP en las etapas que no fueron regadas. El BH rindió 6798 kg ha⁻¹ y no presentó diferencias significativas con los tratamientos RDC Veg+PC y RD, sin embargo, el tratamiento RD sólo utilizó el 50% del agua de riego del BH. Los tratamientos RDC PC y RDC R3-R6 rindieron un 30 y 19% menos que el BH, aunque entre ellos las diferencias no fueron significativas. En lo que respecta a la acumulación de MS, se destacan los altos valores alcanzados por todos los tratamientos al final del PC, con una producción de 15237 kg ha⁻¹ en el tratamiento BH. La TCC durante el PC en promedio fue de 182 kg ha⁻¹ día⁻¹, y tampoco se encontraron diferencias entre los tratamientos. En este experimento, el tratamiento RDC PC fue el que obtuvo la mayor EUA, con 15,2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en términos numéricos, seguido por RDC R3-R6 con 13,7 kg ha⁻¹ mm⁻¹, lo que se explica por una relación inversa entre rendimiento y EUA, presentando los tratamientos con menores rendimientos las mayores EUA. El tratamiento BH logró una EUA de 13 kg ha⁻¹ mm⁻¹, muy similar a la obtenida por los tratamientos RDC Veg+PC y RD. Se encontró que aquellos tratamientos que presentaban menor contenido de AD en el suelo al momento de ocurrir los eventos de PP, fueron capaces de retener una proporción mayor de las mismas que permitió disminuir el uso de agua de riego y una mayor utilización del agua proveniente de las lluvias. Los resultados indican que lo que importa no es el volumen de agua con el que se riegue, sino el momento del ciclo del cultivo en el cual se aplique el mismo, dejando de manifiesto que la estrategia de riego es un aspecto fundamental. En relación a esto se encontró que, además de la importancia de la disponibilidad hídrica en el PC en la determinación del rendimiento, es fundamental que la soja no presente deficiencias hídricas en las ENC previas al PC.

Palabras clave: *Glycine max*; Deficiencias hídricas; Estrategias de riego; Riego deficitario; Riego deficitario controlado; Rendimiento; Biomasa; Tasa de crecimiento en periodo crítico; Eficiencia de uso del agua.

7. SUMMARY

A soybean (*Glycine max*, L.) experiment was developed in the Station Experimental Dr. M. A. Cassinoni located in Paysandú, Uruguay, in the Summer of 2016-17. The trial consisted of applying different irrigation strategies in different stages of the crop and evaluate their effect on the performance and their components, as well as in the production of dry matter (DM), the growth rate (GR) during the critical period (CP) and the efficiency of water use (EWU). Five treatments were evaluated according to the irrigation strategy used and the moment of the crop cycle in which it is applied, they were: WW: water well-being throughout the cycle through supplementary irrigation, CDI CP: controlled deficit irrigation in CP, CDI Veg + CP: controlled deficit irrigation in vegetative and CP, CDI R3-R6: controlled deficit irrigation between R3-R6, DI: deficit irrigation with 50% of the WW irrigation water during the whole cycle. In CDI treatments drought simulators were used to prevent the interception of the precipitations (PPT) in the stages that crops were not watered. The WW gave 6798 kg ha⁻¹ and did not present significant differences with the CDI treatments Veg + CD and DI, however the deficit irrigation (DI) treatment only used 50% of the water used in watering the WW. The CDI CP and CDI R3-R6 treatments show a 30 and 19% decrease than the WW respectively, although among them the differences were not significant. In regards of the accumulation of DM, the high values reached by all the treatments at the end of the CP stand out, with a production of 15237 kg ha⁻¹ in the WW treatment. The GR during the CP on average was 182 kg ha⁻¹ day⁻¹, and no differences were found between treatments. In this experiment, the CDI CP treatment showed the highest EWU in numerical terms, with 15.2 kg ha⁻¹ mm⁻¹, followed by CDI R3-R6 with 13.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹, which is explained by an inverse relationship between performance and EWU, showing treatments with lower performances, the highest EWU. The WW treatment achieved an EWU of 13 kg ha⁻¹ mm⁻¹, very similar to that obtained by the CDI Veg + CP and DI treatments. It was found that those treatments that had lower water availability (WA) content in the soil at the time of PPT events were able to retain a greater proportion of them that allowed to diminish the use of water of irrigation and a greater use of rainwater. The results indicate that what matters is not the volume of water with which crops are watered, but rather the time of the crop cycle in which it is watered, showing that the irrigation strategy is a fundamental aspect. In relation to this, it was found that, not only is water availability of extreme importance during the CP in determining the performance, but also it is essential that soy does not present water deficiencies in the non-critical stages before the CP.

Keywords: *Glycine max*; Water deficiencies; Irrigation strategies; Irrigation Deficit; Controlled deficit irrigation; Performance; Biomass; Rate of growth in critical period; Efficiency of use of Water.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Adeboye, O. B.; Schultz, B.; Adekalu, K. O.; Prasad, K. 2015. Crop water productivity and economic evaluation of drip-irrigated soybeans (*Glycine max L. Merry.*). (en línea). Agriculture and Food Security. 4(10):1-13. Consultado 18 oct. 2017. Disponible en <https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/article/10.1186/s40066-015-0030-8#citeas>
2. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: guidelines for Computing Crop Water Requirements. Roma, FAO. 300 p. (FAO. Irrigations and Drainage no. 56).
3. _____.; _____.; _____.; _____. 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).
4. Andrade, F. H.; Aguirrezábal, L. A. N.; Rizzalli, R. H. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Editorial Médica Panamericana. pp. 61 - 96.
5. _____.; 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, Editorial Médica Panamericana. pp. 173-206.
6. Andriani, J. M.; Andrade, F. H.; Suero, E. E.; Dardanelli, J. L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. (en línea). Agronomie. 11: 737- 746. Consultado 25 may. 2018. Disponible en https://www.agronomy-journal.org/articles/agro/pdf/1991/09/Agronomie_0249-5627_1991_11_9_ART0004.pdf
7. _____. 1997. Uso del agua y riego. INTA. Agro de Córdoba no. 4. 10 p.

8. Baigorri, H. E. J. 1997. Ecofisiología del cultivo. In: Giorda, L. M.; Baigorri, H. E. J. eds. El cultivo de soja en Argentina. Córdoba, INTA Manfredi. pp. 29-50.
9. Bennett, J. M.; Albrecht, S. L. 1984. Drought and Flooding Effects on N₂ Fixation, Water Relations, and Diffusive Resistance of Soybean. *Agronomy Journal*. 76: 735-740.
10. Bernard, R. L. 1972. Two genes affecting stem termination in soybeans. *Crop Science*. 12: 235-239.
11. Bodrero, M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. In: Jornada Nacional de la Soja (2003, Mercedes). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1- 13 (Actividades de Difusión no. 325).
12. Bustomi Rosadi, R. A.; Afandi; Senge, M.; Ito, K.; Adomako, J. T. 2007. The effect of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (*Glycine max [L.] Merr.*). (en línea). *Paddy and Water Environment*. 5(163): 163-169. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en <https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/article/10.1007/s10333-007-0080-z#citeas>
13. 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. Merry.*) in sub-humid climatic conditions. (en línea). *Agricultural Water Management*. 118: 113-121. Consultado 11 jun. 2018. Disponible en <https://kundoc.com/pdf-yield-quality-and-crop-water-stress-index-relationships-for-deficit-irrigated-so.html>
14. _____.; Yazgan, S. 2016. Yield and quality response of soybean to full and deficit irrigation at different growth stages under sub-humid climatic conditions. (en línea). *Tarım Bilimleri Dergisi*. 22(2): 129-144. Consultado 14 jul. 2018. Disponible en <http://dergipark.gov.tr/download/issue-full-file/31847>
15. Capurro, M. C. 2016. Determinación de las necesidades hídricas y respuesta al riego en el cultivo de soja. Tesis Magister en Ciencias Agrarias opción Ciencias del Suelo. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 153 p.

16. _____.; Beretta, A.; García, C.; Sawchik, J.; Puppo, L. 2017. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia (Uruguay)*. 21(2): 65-76.
17. Cárcova, J.; Abeledo, L. G.; López Pereira, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D.J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 74-98.
18. Chai, Q; Gan, Y.; Zhao, C.; Xu, H.; Waskom, R. M.; Niu, Y.; Siddique, K. H. M. 2016. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. (en línea). *Agronomy for Sustainable Development*. 36(3): 1-21. Consultado 21 nov. 2017. Disponible en <https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/article/10.1007/s13593-015-0338-6#citeas>
19. Cooper, R. L. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. (en línea). *Field Crops Research*. 83: 27-35. Consultado 1 jun. 2018. Disponible en <https://pubag.nal.usda.gov/download/12978/PDF>
20. Cregan, P. B.; Hartwig, E. E. 1984. Characterization of Flowering Response to Photoperiod in Diverse Soybean Genotypes. *Crop Science*. 24 (4): 659-662.
21. Cruz, G.; Munka, G.; Pedocchi, R. 2000. Caracterización agroclimática de la región litoral centro oeste de la República Oriental del Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 9(1): 87-92.
22. Dardanelli, J. L.; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; de La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 377-406.
23. 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, Editorial Médica Panamericana. pp. 155-171.

24. Desclaux, D.; Huynh, T.; Roumet, P. 2000. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. *Crop Science*. 40: 716–722.
25. Egli, D. B. 1998. *Seed Biology and the yield of the grain crops*. (en línea). 2nd. ed. Boston, CAB International. 219 p. Consultado 18 oct. 2017. Disponible en https://books.google.com.uy/books?hl=es&lr=&id=XaB2DgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=+Seed+Biology+and+the+yield+of+the+grain+crops&ots=GTDXvda_Sa&sig=4wqgH7C9yx-sq3ZcH4hLxd9HXBw#v=onepage&q&f=false
26. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2016. *Aquastat*. (en línea). Rome. s.p. Consultado 24 jul. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/regions/URY/indexesp.stm>
27. _____. 2017. *Faostat*. (en línea). Rome. s.p. Consultado 10 jun. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
28. Farias, J. R.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. *Ecofisiología da soja*. EMBRAPA. Circular Técnica. no. 48: 1-9.
29. Fehr, W.; Caviness, C. 1977. *Stages of Soybean Development*. (en línea). Ames, Iowa Agricultural and Home Economics Experiment Station. 11 p. Consultado 17 oct. 2017. Disponible en <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1076&context=specialreports>
30. Fereres, E.; Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. (en línea). *Journal of Experimental Botany*. 58(2): 147–159. Consultado 14 dic. 2017. Disponible en <https://academic.oup.com/jxb/article/58/2/147/534071#8396221>
31. _____.; Villalobos, F.J. 2016. Deficit Irrigation. (en línea). In: Villalobos, F.; Fereres, E. eds. *Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture*. Cham, Springer. pp. 218-294. Consultado 24 oct. 2017. Disponible en https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/chapter/10.1007/978-3-319-46116-8_21

32. Foster, P.; Rovegno, F. 2015. Efectos de diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas fenológicas de soja sobre el rendimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 68 p.
33. Friza, S.; Sebben, G.; Tejera, M. 2018. Efecto de distintas estrategias de riego deficitario sobre el rendimiento y el uso del agua en soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 80 p.
34. García Petillo, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012, Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 23-31.
35. García-Tejero, I. F.; Durán-Zuazo, V. H.; Muriel-Fernández, J. L.; Rodríguez-Pleguezuelo, C. R. 2011. Water and Sustainable Agriculture. (en línea). Dordrecht, Springer. 94 p. Consultado 18 oct. 2017. Disponible en https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/ chapter/10.1007/978-94-007-2091-6_1#citeas
36. GDR (Grupo de Desarrollo del Riego, UY). 2010. Prólogo. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 3-4.
37. Giménez, L. 2010. Efecto de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º., 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 29-37.
38. _____; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. (en línea). Agrociencia (Uruguay). 15(2): 100-108. Consultado 15 jul. 2018. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/index.php/directorio/article/view/79/37>

- 39._____. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? (en línea). *In*: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (2º., 2012 Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 33-41. Consultado 1 feb. 2018. Disponible en <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/Libro-2-Seminario-Internacional-de-Riego-en-Cultivos-y-Pasturas.pdf>
- 40._____. 2014a. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. (en línea). *Agrociencia* (Uruguay). 18(1): 53-64. Consultado 1 feb. 2018. Disponible en http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S2301-15482014000100006&script=sci_arttext&tlng=pt
- 41._____.; Canosa, G.; Prieto, C.; Grasso, J. P.; Montero, A.; Rameau, M.; Rosa, A.; Arévalo, R. 2014b. Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. (en línea). *In*: Giménez, L. ed. Riego suplementario en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 9-28 (Serie Técnica no. 55). Consultado 2 jul. 2018. Disponible en <http://inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/ fpta-55.p-28.pdf>
- 42.Hasanuzzaman, M.; Nahar, K.; Rahman, A.; Mahmud, J. A.; Hossain, M. S.; Fujita, M. 2016. Soybean Production and Environmental Stresses. (en línea). *In*: Miransari, M. ed. Environmental Stresses in Soybean Production. Isfahan, Elseiver. pp. 61-102 (Soybean Production vol. 2). Consultado 18 oct. 2017. Disponible en https://www.sciencedirect-com.proxy.timbo.org.uy:88/science?_ob=ShoppingCartURL&_method=add&_eid=3-s2.0-B9780128015353000048&_reqID=125398195&md5=f7bbb0b8aef647d2ba882f1738807b4c&shop_Drawdown=A
- 43.Hera, C. 1978. Effects of management practices on dinitrogen fixation in temperate regions. *In*: Isotopes in Biological Dinitrogen Fixation (1978, Vienna). Reports. Vienna, International Atomic Energy Agency. pp. 191-209.

44. Kantolic, A.; Giménez, P. I.; De La Fuente, E. B. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. In: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D.J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
45. _____. 2008. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. (en línea). Revista Facultad de Agronomía (UBA). 28(1): 63-88. Consultado 18 jun. 2018. Disponible en <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/2008Kantolic.pdf>
46. 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.
47. KeShun, L. 1997. Agronomic Characteristics, Production, and Marketing. (en línea). In: *Soybeans Chemistry, Technology, and Utilization*. Singapore, Springer. pp. 1-24. Consultado 5 oct. 2017. Disponible en <https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/book/10.1007/978-1-4615-1763-4>
48. Kirda, C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Deficit Irrigation Practices, Water Reports. no. 22. pp. 3-10.
49. Kucey, R. M. N.; Chaiwanakupt, P.; Arayangkool, T.; Snitwongse, P.; Siripaibool, C.; Wadisirisuk, P.; Boonkerd, N. 1988. Nitrogen fixation (15N dilution) with soybeans under Thai field conditions. (en línea). *Plant and Soil*. 108: 87-92. Consultado 25 oct. 2017. Disponible en <https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/article/10.1007/BF02370103#citeas>

50. Liu, F.; Andersen, M. N.; Jacobsen, R. S.; Jensen, C. R. 2004. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max L. Merr.*) during progressive soil drying. (en línea). *Environmental and Experimental Botany*. 54: 33-40. Consultado 5 oct. 2017. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847204000772>
51. Martignone, R. A.; Enrico, J. M.; Bodrero, M. L.; Andriani, J. M. 2010. Factores asociados con la variabilidad de rendimientos entre grupos de madurez en soja. (en línea). INTA. Para Mejorar la Producción. no. 45: 25-33. Consultado 18 jun. 2018. Disponible en <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-factores-asociados-con-la-variabilidad.pdf>
52. Mondino, M.; Gómez, D. 2006. Evolución de la intercepción de la radiación incidente y la producción de biomasa en soja de siembras extratempranas a diferentes espaciamientos. Entre Ríos, Argentina, Universidad Nacional de Entre Ríos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Sección Ecofisiología y Climatología. pp. 83-86.
53. Montoya, F.; García, C.; Pintos, F.; Otero A. 2017. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. (en línea). *Agricultural Water Managment*. 193: 30-45. Consultado 25 oct. 2017. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377417302573>
54. Morales, P.; García, M.; García, C.; Beretta, A.; Moreno, G.; Camio, G. 2014. Pivotes en Uruguay Evaluación de su funcionamiento. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (3º., 2014, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 66-76.
55. Nakayama, F. 1980. Los componentes fisiológicos del rendimiento en la soja. (en línea). *Revista UNR. Facultad de Agronomía*. 1(1): 97-107. Consultado 28 may. 2018. Disponible en http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/29278/Documento_completo.pdf?sequence=1
56. Neyshabouri, M. R.; Hatfield, J. L. 1986. Soil water deficit effects on semi-determinate and indeterminate soybean growth and yield. *Field Crops Research*. 15(1): 73-84.

57. Otero, A.; García, C. 2017. El riego suplementario en pasturas y cultivos. Revista INIA. no. 48: 73-75.
58. Pagano, M. C.; Miransari, M. 2016. The importance of soybean production worldwide. (en línea). In: Miransari, M. ed. Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production. Isfahan, Elsevier. pp. 1-18. (Soybean Production vol. 1). Consultado 18 oct. 2017. Disponible en https://books.google.com.uy/books?hl=en&lr=&id=ILV0BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Marcela+Claudia+Pagano,+Mohammad+Miransari+and+The+importance+of+soybean+production+worldwide,+Abiotic+and+Biotic+Stresses+in+Soybean+Production,&ots=2pgeNcxCoN&sig=qssf3ICOkM_X8jfmyFY2IPpan4Q#v=onepage&q=Marcela%20Claudia%20Pagano%2C%20Mohammad%20Miransari%20and%20The%20importance%20of%20soybean%20production%20worldwide%2C%20Abiotic%20and%20Biotic%20Stresses%20in%20Soybean%20Production%2C&f=false
59. Pahalwan, D. K.; Tripathi, R. S. 1984. Nodulation, accumulation and redistribution of nitrogen in soybean (*Glycine max (L.) Merrill*) as influenced by seed inoculation and scheduling of irrigation. (en línea). Plant Soil. 81(235): 235-246. Consultado 20 oct. 2017. Disponible en <https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/article/10.1007/BF02197157>
60. Prieto Angueira, S.; Prieto-Garra, D. R.; Angella, G. A. 2012. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de soja (*Glycine Max (L.) Merril*). (en línea). Santiago del Estero, INTA. 10 p. Consultado 13 jul. 2018. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-evaluacion_de_diferentes_estrategias_de_riego_deficitario_controlado_en_el_cultivo_de_soja.pdf
61. Reddy, P. P. 2016. Deficit Irrigation. (en línea). In: Sustainable Intensification of Crop Production. Singapore, Springer. pp. 241-252. Consultado 19 oct. 2017. Disponible en https://link-springer-com.proxy.timbo.org.uy:88/chapter/10.1007/978-981-10-2702-4_16

62. Rodríguez, H.; Dardanelli, J.; De Battista, J.; Castellá, M.; Chaix, X.; Rochás, M.; Burgos, G. s.f. Evaluación de respuesta en rendimiento al riego suplementario en soja sobre un suelo Vertisol. Entre Ríos, INTA EEA Concepción del Uruguay. pp. 1-5.
63. Sadras, V. O.; Ferreiro, F.; Gutheim, F.; Kantolic, A. G. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, Editorial Médica Panamericana. pp. 29-60.
64. Salvagiotti, F. 2009. Las mejores prácticas para el manejo del nitrógeno en soja. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 42: 57-62.
65. _____; Enrico, J. M.; Bodrero M.; Bacigaluppo, S. 2010. Producción de soja y uso eficiente de los recursos. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 45: 151-154.
66. Sinclair, T. R.; Weisz, P. R. 1985. Response to soil temperature of dinitrogen fixation (Acetylene reduction) rates by field grown soybean. *Agronomy Journal*. 77: 685–688.
67. Toledo, R. s.f. Soja: su ecofisiología y manejo. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 31 p. Consultado 30 nov. 2017. Disponible en <https://www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Soja-su-ecofisiologia-y-manejo.pdf>
68. Zampedri, S. M.; Currie, H. M. 2000. Impacto del riego complementario en los rendimientos del cultivo de la soja en el centro sur de la Provincia de Corrientes. *In*: Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas (7ª., 2000, Corrientes, AR). Trabajos presentados. Corrientes, AR, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra Hidrología Agrícola. pp. 1-3.