

Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego

Capurro M^a Cristina¹, Beretta Andrés¹, García Claudio², Sawchik Jorge¹, Puppo Lucía³

¹Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), La Estanzuela. Ruta 50, km 11, 70006 Colonia, Uruguay. Correo electrónico: mcapurro@inia.org.uy

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Las Brujas. Ruta 48, km 10, 90200 Canelones, Uruguay

³Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Avenida Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay.

Recibido: 2016-08-16 Aceptado: 2017-10-06

Resumen

En el Uruguay, las condiciones climáticas y la capacidad de almacenaje de agua disponible de los suelos determinan que existan períodos donde la demanda por evapotranspiración (ET) supera al agua disponible, produciendo un déficit hídrico para las plantas. La alta variabilidad interanual de las precipitaciones agrava esta situación, provocando períodos deficitarios que ocasionan importantes detrimentos en los rendimientos. La implementación del riego para satisfacer los requerimientos totales de ET requiere grandes cantidades de agua. La aplicación del agua por debajo de los requerimientos totales se define como riego deficitario y es una estrategia que aumenta la productividad del agua. La técnica conocida como riego deficitario controlado (RDC) que considera la sensibilidad de las fases de desarrollo del cultivo al estrés hídrico podría lograr un incremento aún mayor en la productividad del agua. Este trabajo se basa en la aplicación de estas prácticas y sus consecuencias en el cultivo de soja. En dos ensayos se evaluó el impacto de dosis y momentos de riego. Se observó una respuesta lineal plus-plateau del rendimiento respecto al agua total efectiva. El déficit hídrico produjo una importante reducción en el rendimiento. La técnica de RDC es una alternativa que en las condiciones de Uruguay permitiría lograr rendimientos máximos con ahorros de agua de hasta un 22 %. La ejecución de un balance hídrico diario siguiendo la metodología descrita en la Guía FAO N° 56 resulta fundamental para el correcto manejo del riego.

Palabras clave: evapotranspiración, riego deficitario, productividad del agua, programación del riego

Yield of Soybean in Response to Different Doses and Moments of Irrigation

Summary

In Uruguay, climatic conditions and soil water availability determine periods where evapotranspiration (ET) exceeds available water, producing a water deficit for the plants. Due to our interannual rainfall variability, this situation worsens and yield losses occur caused by deficit periods. Implementing irrigation to meet the requirements of ET needs large amounts of water. The application of water below the requirements for maximum ET is defined as deficit irrigation (DI) and is a strategy that increases water productivity. The technique known as regulated deficit irrigation (RDI), which considers the sensitivity of crop development phases to water stress can improve water productivity even more. This research studies these irrigation practices and their impact on the soybean crop yield. Two trials were evaluated using different doses and irrigation timings. According to the results, there is a linear-plateau response of yields to total effective water. Water deficits caused a significant yield reduction. RDI irrigation strategy showed to be an alternative that in Uruguayan conditions can achieve maximum yields allowing water savings up to 22 %. The usage of a daily water balance schedule according to the FAO Guide N° 56 methodologies is essential for a proper irrigation management.

Keywords: evapotranspiration, deficit irrigation, water productivity, irrigation scheduling

Introducción

Desde el 2001/2002 se ha venido produciendo una gran expansión de los cultivos extensivos de verano en el Uruguay, con excepción del cultivo de arroz que ha sufrido un descenso en el área sembrada a partir de 2010. Entre estos cultivos, la soja ha tenido el mayor aumento en área sembrada, siendo hoy el principal cultivo agrícola en Uruguay. Según las últimas estadísticas el cultivo de soja presenta un área sembrada de 1.140.000 ha con un rendimiento promedio de 1937 kg ha⁻¹ de grano, exportado en su mayoría (DIEA, 2016).

Las condiciones climáticas de nuestro país y la capacidad de almacenamiento de agua disponible del suelo determinan que existan períodos de deficiencia hídrica, donde la demanda por evapotranspiración (ET) supera al agua disponible (Agorio et al., 1988; Sawchik y Ceretta, 2005). A lo anterior se suma la alta variabilidad interanual de las precipitaciones (Castaño et al., 2011) que puede agravar esta situación provocando frecuentes períodos deficitarios que ocasionan una alta variabilidad de los rendimientos entre años (Henry, 1973; Sawchik y Ceretta, 2005; Andersen et al., 2001, Giménez y García-Petillo, 2011).

El riego suplementario es una herramienta para atenuar los períodos de estrés hídrico (Henry, 1973; Baethgen y Terra, 2010), permitiendo alcanzar y mantener una alta productividad por unidad de superficie, siempre que no haya otros factores limitantes (Henry, 1973; Agorio et al., 1988; Giménez, 2012). La implementación del riego para satisfacer los requerimientos completos (100 % ET) requiere grandes cantidades de agua (Fereris y Soriano, 2007). La aplicación del agua por debajo de los requerimientos totales se define como riego deficitario (RD) (English, 1990). La implementación del riego deficitario permitiría aumentar el área de cultivos regados sin aumentar las cantidades de agua suministradas, condición que podría ser trascendente en un escenario en donde se pague por m³ de agua consumida, con una clara disminución en los costos directos al reducir los costos energéticos. La técnica conocida como riego deficitario regulado o controlado (RDC) que considera la sensibilidad de las fases de desarrollo del cultivo al estrés hídrico puede lograr un incremento aún mayor en la productividad del agua (Chalmers, Mitchell y van Heek, 1981).

En el cultivo de soja, el déficit hídrico durante llenado de grano reduce considerablemente el número y tamaño de grano, lo cual condiciona la concreción del rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1980; Kadhem, Specht y Williams,

1985; Andriani et al., 1991; Andriani, 2006; Wani, Heng y Vajja, 2012). Varios autores encontraron que la ocurrencia de déficit hídrico durante llenado de grano, R₄-R₆, tuvo mayores detrimentos en el rendimiento de grano que en el período R₁-R₄. Los estudios reflejan asimismo mecanismos efectivos de compensación de las plantas cuando son sometidas a déficit hídrico durante etapas más tempranas del crecimiento (Doorenbos y Kassam, 1980; Andriani et al., 1991, Karam et al., 2005). De esta forma, se podría lograr una mejora en la eficiencia de uso del agua realizando un manejo estratégico del riego según la distinta sensibilidad al estrés hídrico de las fases de desarrollo del cultivo.

El presente trabajo se basó en la aplicación de distintas técnicas de riego y cantidades de agua para estudiar sus consecuencias en el cultivo de soja. Este estudio tuvo como objetivos: 1) evaluar la respuesta en rendimiento del cultivo, a tres niveles de humedad, durante todo el ciclo del cultivo, con una combinación de dos niveles de humedad durante el desarrollo vegetativo hasta inicio de R₄ y desde R₄ hasta fin de R₆; buscando ajustar la función rendimiento-dosis de agua, 2) analizar el efecto del agotamiento de agua disponible en un brunosol éutrico típico sobre el rendimiento de la soja, 3) evaluar la utilización del balance hídrico diario según la metodología descrita en la Guía FAO N° 56 (Allen et al., 2006) como herramienta para predecir las necesidades de riego.

Materiales y métodos

Este estudio se realizó en dos sitios, ubicados en las estaciones experimentales del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA): La Estanzuela (latitud 34° 20' S, longitud 57° 41' y altitud 81 msm) ubicado en el departamento de Colonia, Ruta 50, km 11, paraje Estanzuela, y Las Brujas (latitud 34° 40' S, longitud 56° 20' y altitud 32 msm), ubicado en el departamento de Canelones, Ruta 48, km 10, paraje Rincón del Colorado, ambos suelos caracterizados como brunosoles éutricos típicos. En el primer sitio se realizó un experimento a campo y en el segundo sitio se utilizaron 12 lisímetros de drenaje protegidos de la lluvia por una estructura rain-out shelter.

El riego se aplicó con un equipo de riego por goteo debido a que es más preciso en la entrega de las cantidades de agua de riego y permite que el experimento ocupe menor superficie, ambos factores minimizan el error experimental (Torrión et al., 2015). En ambos sitios se cultivó la variedad Nidera 4955, de ciclo medio, indeterminada, con una población objetivo de 300.000 pl ha⁻¹. Se aseguró el control total

de malezas, plagas y enfermedades de manera de que estas no disminuyeran el potencial de rendimiento.

En cada sitio experimental se realizó la caracterización climática. En La Estanzuela se analizó además la probabilidad de ocurrencia de lluvia realizando un análisis de frecuencias acumuladas para los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero, utilizando los datos históricos de lluvias desde 1970 hasta el 2016. Se consideró la variable lluvia con una distribución Gamma incompleta y se calculó la probabilidad de excedencia del total de lluvias acumuladas desde siembra hasta enero.

En cada sitio se realizó la caracterización hídrica del suelo (Cuadro 1). Se determinaron los parámetros: contenido de agua a punto de marchitez permanente (PMP), contenido de agua a capacidad de campo, y contenido de agua disponible en el suelo (AD). Para determinar capacidad de campo se utilizó la metodología descrita según García et al. (2012) y PMP se estimó mediante regresión de Silva et al. (1988). Para el sitio Las Brujas estas variables se midieron además mediante las ollas de presión según la metodología de Richards (1948; 1956), determinando las curvas de tensión humedad.

Los estados fenológicos del cultivo fueron determinados semanalmente utilizando la escala de Fehr et al. (1971); Fehr y Caviness (1977) por la misma persona en ambos sitios. La proyección de los estados fenológicos para la estimación de la evolución del cultivo y la duración de las fases para estimar la evolución del coeficientes del cultivo (K_c) se realizó a partir del modelo fenológico obtenidos por Fassio et al. (2013), disponible como una aplicación web. Esta aplicación web se encuentra disponible en el sitio web de INIA/GRAS/utilidades de los Sistemas de Información y

Teledetección. Estas proyecciones eran corregidas a través de la determinación semanal de la fenología y medidas de cobertura del suelo con un ceptómetro (marca Decagon, modelo Accupar LP-80) en cada parcela y sitio. La evolución del K_c estimado de esta forma se utilizó para estimar la ET_c en el balance hídrico con el que se manejó el riego.

Se determinó la humedad del suelo mediante medidas con sonda de neutrones, marca Troxler Electronics Laboratories, Inc., 4300, en La Estanzuela y CPN (modelo 503, Campell Pacific Nuclear Corp., CA, USA), en Las Brujas. Para esta medida se instalaron tubos de acceso de aluminio, un tubo por parcela de 1,18 m de profundidad en la entrefila del cultivo. Las medidas se realizaron dos a tres veces por semana previo al riego para las profundidades de 0 a 20 cm, de 20 a 40 cm, de 40 a 60 cm y de 60 a 1 m de profundidad. Se realizó la calibración para cada equipo siguiendo la metodología de Haverkamp, Vauclin y Vachaud (1984) y Puppo et al. (2014).

En ambos sitios se realizó un balance hídrico diario para cada tratamiento de riego, siguiendo el protocolo y cálculos descritos en la Guía FAO N° 56 (Allen et al., 2006). La evapotranspiración de referencia (ET_0) se determinó según la ecuación de Penman Monteith con los datos de cada estación climática respectiva de cada estación experimental para cada sitio. Para estimar la ET_c del cultivo se multiplicó la ET_0 por el K_c . Se utilizó un K_c inicial de 0,5, K_c medio de 1,15 y final de 0,5, valores de tabla propuestos por Allen et al. (1998). Para Las Brujas se utilizó un K_c inicial de 0,8, según la metodología propuesta por Allen et al. (1998) para humedecimientos frecuentes, método gráfico, para frecuencias de riego cada dos días.

Cuadro 1. Caracterización del suelo para INIA Las Brujas e INIA La Estanzuela.

Sitio	Profundidad cm	D. Ap. ¹ g cm ⁻³	CC ² -----% volumen-----	PMP ³	AD ⁴	AD horizonte ⁻¹ mm
Las Brujas	0-20	1,28	34,0	18,78	15,25	30,50
	20-40	1,32	37,8	21,36	16,43	32,85
	40-60	1,40	38,9	21,82	17,13	34,25
	60-90	1,42	38,8	21,62	17,19	34,4
La Estanzuela	0-20	1,23	37,2	21,4	15,79	31,57
	20-50	1,36	41,0	23,3	17,77	53,31
	50-65	1,38	36,5	19,9	16,60	24,90
	65-90	1,39	38,1	21,2	16,85	42,13

¹ Densidad aparente; ² Capacidad de Campo; ³ Punto de Marchitez Permanente; ⁴ Agua disponible.

Se determinaron semanalmente, para todas las parcelas y en ambos sitios, las variables porcentaje de cobertura del suelo (CC_o) mediante la medición de la intercepción de luz utilizando un ceptómetro y conductancia estomática, mediante un porómetro (marca Decagon, modelo SC-1). Al momento de cosecha se determinó el rendimiento de grano y los componentes del rendimiento.

Las dosis de riego se midieron mediante los balances hídricos para cada tratamiento y sitio. Cada vez que se llegaba al umbral de agotamiento de agua disponible (p) de 0,4 ($p = 0,4$) para la profundidad radicular determinada y corregida diariamente, se aplicaba una lámina de agua variable entre 12 mm y 16 mm. De esta forma el contenido de humedad del suelo se mantuvo por debajo de CC y por encima del umbral prefijado. Todos los tratamientos se regaban en el mismo momento pero variando el tiempo de riego según el tratamiento.

Estación Experimental INIA La Estanzuela «Dr. Alberto Boerger»

El ensayo se sembró el 29 de octubre del 2015, con un diseño experimental en bloques completos al azar con tres repeticiones. Las parcelas fueron de 10 m por 4,56 m, sembradas con una distancia entre hileras de 0,4 m.

Los tratamientos instalados consistieron en un tratamiento sin riego; un tratamiento en el que se cubrió totalmente la evapotranspiración de cultivo (ET_c) durante todo el ciclo (100 %); dos tratamientos con riego deficitario continuo, satisfaciendo el 75 % de la ET_c (75 %) y el 50 % de la ET_c (50 %); y dos tratamientos de riego deficitario controlado, uno satisfaciendo el 100 % de la ET_c durante el momento 1 y el 50 % durante el momento 2 (100/50 %); y el otro satisfaciendo durante el momento 1 el 50 % de la ET_c y en el momento 2 el 100 % (50/100 %). El momento 1, considerado para los tratamientos de RDC, se definió como el período de tiempo desde la siembra hasta que el cultivo culmina el estadio R_3 . El momento 2 se definió como el período crítico (PC), desde inicios de R_4 hasta R_6 inclusive.

Estación Experimental INIA Las Brujas «Wilson Ferreira Aldunate»

El ensayo se realizó en 12 lisímetros de drenaje, de 1,9 m de largo x 0,9 m de ancho y 1,35 m de profundidad, de fibra de vidrio. Los lisímetros se encuentran enterrados, coincidiendo el nivel del suelo de relleno con el nivel del suelo circundante y rellenos con el suelo característico del sitio, manteniendo su estructura y secuencia de horizontes. Se encuentran dentro de un rain-out shelter, estructura cons-

truida para evitar los eventos de lluvia. El rain-out shelter consiste en una estructura metálica completamente cerrada a los lados y techo a dos aguas, que se desliza sobre rieles. Dicha estructura se mantuvo siempre abierta y se cerró cuando se presentaron eventos de lluvia por encima de 3 mm. Inicialmente, durante los primeros 25 días del cultivo el shelter se mantuvo abierto para evitar posibles alteraciones en la plántula.

El ensayo se sembró el 1° de diciembre del 2015, con una distancia entre hileras de 0,38 m, con cinco filas dentro de cada lisímetro. El diseño experimental fue en parcelas al azar con tres repeticiones. Los tratamientos instalados fueron: uno satisfaciendo el 100 % de la ET_c ; dos tratamientos con riego deficitario continuo, satisfaciendo el 75 % y otro satisfaciendo el 50 % de la ET_c ; un tratamiento de RDC, satisfaciendo el 50 % de la ET_c durante el momento 1 y el 100 % durante el momento 2 (50/100 %). Los momentos 1 y 2 fueron definidos de igual forma que para el sitio La Estanzuela.

El análisis estadístico se realizó con el software Infostat/P. Se realizó un análisis de contrastes por sitio y uno en conjunto, para identificar el efecto de dosis y estrategias de riego en el agotamiento del agua del suelo y en el rendimiento final de grano. Se plantearon los contrastes entre los distintos tratamientos y el tratamiento 100 %.

Resultados y discusión

Las condiciones ambientales produjeron escenarios de alta demanda hídrica en ambos sitios, ya que las precipitaciones no superaron la ET_o . En La Estanzuela se registraron ET_o acumuladas de 253 mm y 435 mm para los períodos desde siembra a R_1 y desde R_1 a R_6 , respectivamente. Para el período entre R_4 a R_6 la ET_o acumulada fue de 253 mm. El período reproductivo y gran parte del PC coincidieron con los momentos de menor precipitación acumulada. Desde R_1 hasta R_6 se registraron 212 mm de lluvia acumulada y en el período entre R_4 a R_6 la acumulada fue de 168 mm (desde el 19 de enero al 7 de marzo). Las precipitaciones estuvieron concentradas en la última fase de PC.

El análisis de las frecuencias acumuladas de lluvias desde siembra a R_4 muestra que esta zafra se caracterizó por ser un año frecuente, con un período de retorno de 1,3 años. En las condiciones del sur del Uruguay existe un 80 % probabilidad de que llueva más de 323 mm en el período desde octubre a enero. Por otro lado, las precipitaciones de enero fueron particularmente bajas ya que existe un 92 % de probabilidad de que llueva más de 50 mm en enero, donde ocurrió el PC.

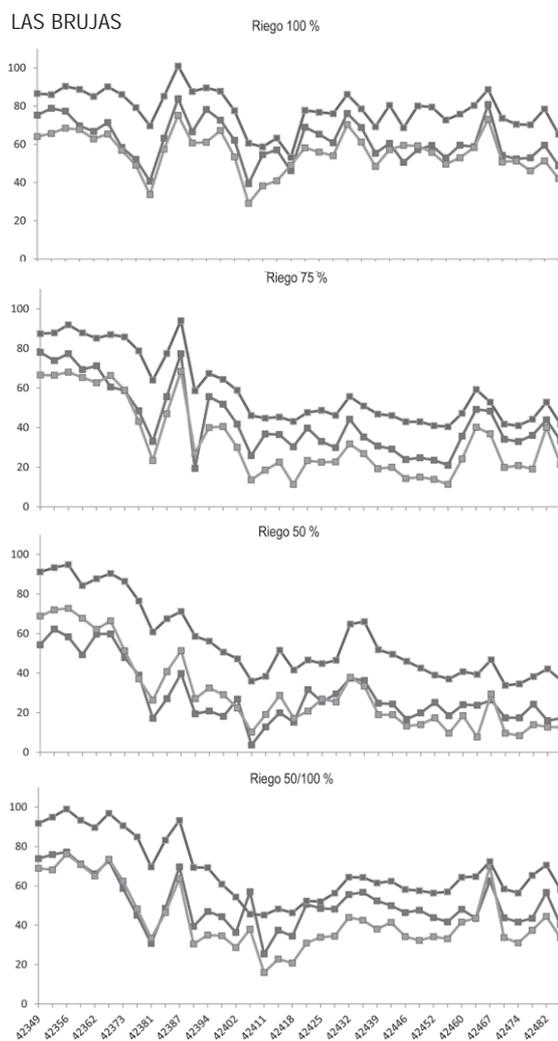
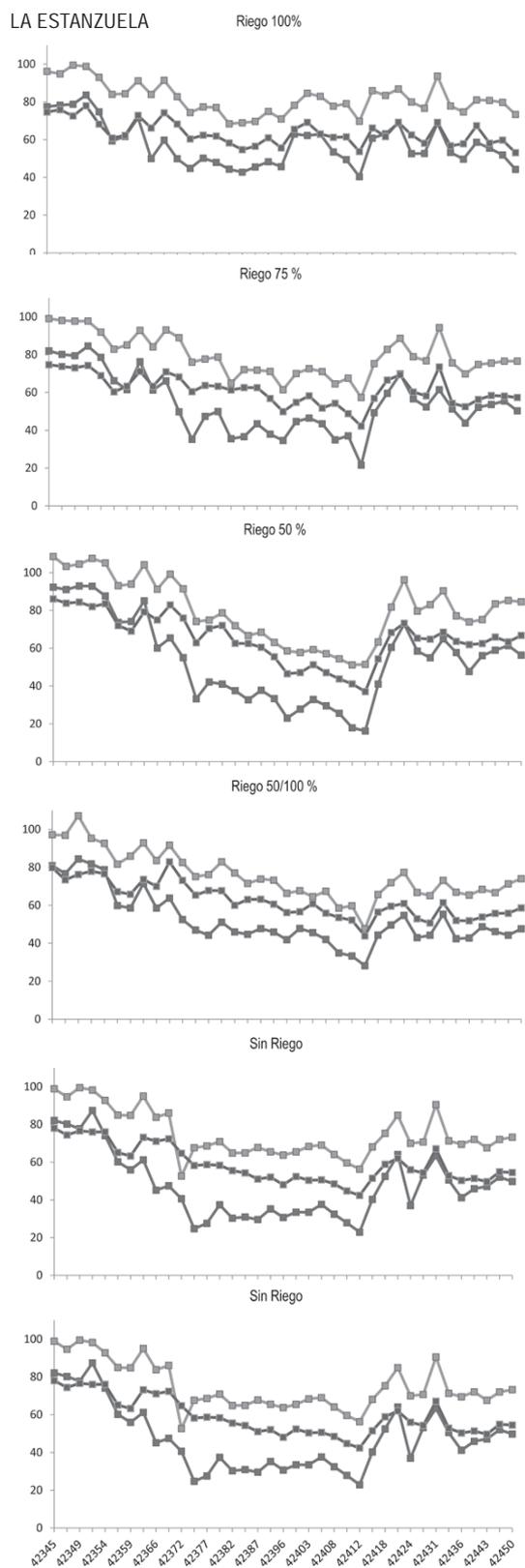


Figura 1. Evolución de humedad en el suelo en relación al agua disponible según tratamiento y sitio.

En Las Brujas se registraron ET_0 acumuladas de 238 mm y 378 mm para los períodos desde siembra a R_1 y desde R_1 a R_6 , respectivamente y de 240 mm desde R_4 a R_6 .

Estación Experimental INIA La Estanzuela «Dr. Alberto Boerger»

La humedad del suelo del tratamiento 100 % se mantuvo con valores iguales o mayores al 50 % del agua disponible (AD) en las distintas profundidades monitoreadas. De esta forma se pudo constatar un correcto manejo del riego. El resto de los tratamientos de riego se manejó con un agregado de agua inferior a este tratamiento causando un déficit hídrico progresivo. Los agotamientos de AD provocados por los tratamientos de riego fueron máximos durante el PC (Figura 1).

Las medidas de contenido de humedad del suelo determinadas con sonda de neutrones presentaron valores muy bajos hasta 20 cm de profundidad. Este registro de humedad no fue tenido en cuenta para el monitoreo de los tratamientos y no se incluyó en las figuras que muestran la evolución de la humedad en el perfil. En este sentido Hillel (2004) expresó que mediciones en los primeros 20 cm del suelo son imprecisas debido al posible escape de neutrones hacia la atmósfera.

El monitoreo de humedad del suelo constató las condiciones benignas a mediados de febrero ocasionadas por los eventos de lluvia que ocurrieron entre el 12 y el 18 de febrero, a partir de la fase fenológica R_{5,5}. En este período llovieron 131 mm que permitieron la recarga del perfil de suelo, beneficiando a los tratamientos de riego deficitario (Figura 1).

Al inicio de la etapa reproductiva el tratamiento sin riego fue el que presentó el mayor agotamiento del AD, 75 %, en la profundidad de 20 a 40 cm, y 54 % en promedio para la profundidad de 20 a 60 cm (cuando el cultivo se encontraba en R₂). Se mantuvo relativamente estable en ese rango durante 40 días hasta R₅. El agotamiento en el tratamiento 50 % también alcanzó niveles similares, sin embargo en el tratamiento sin riego el agotamiento se mantuvo por más tiempo (Figura 1).

El seguimiento de los estados fenológicos semanales mostró que la fenología se vio afectada por las deficiencias hídricas. El tratamiento sin riego se comportó de forma diferente respecto a los tratamientos regados. Se evidenció un adelanto en la maduración del cultivo provocado por el estrés hídrico a partir de R₄. Estos resultados coinciden con lo reportado por Torrión et al. (2015), Specht, Williams y Weidenbenner (1986) y Wani, Heng y Vajja (2012).

La ET_c tuvo una evolución similar a la evolución de la ET_o debido a que es consecuencia de la misma y de la evolución del K_c. Se encontraron picos de máximo consumo entorno a R₂ y a R₄ (Figura 2).

La duración de las fases fenológicas para estimar la evolución del K_c guardó relación con las medidas de CC_o (Figura 2), coincidiendo con lo reportado por Allen et al. (1998). En etapas tempranas el riego aceleró la cobertura del suelo. En los tratamientos regados, la máxima cobertura del cultivo se alcanzó el 29 de diciembre cuando el cultivo estaba en R₂, momento en el que se registró un IAF cercano a 5 (4,8). Por otro lado, en el tratamiento sin riego la máxima cobertura se alcanzó también en diciembre pero unos días después que en los tratamientos regados. El 80 % de cobertura del cultivo para el tratamiento 100 % se alcanzó el 21 de diciembre con un IAF de 3, cuando el cultivo estaba en floración, entre R₁ y R₂, coincidiendo con

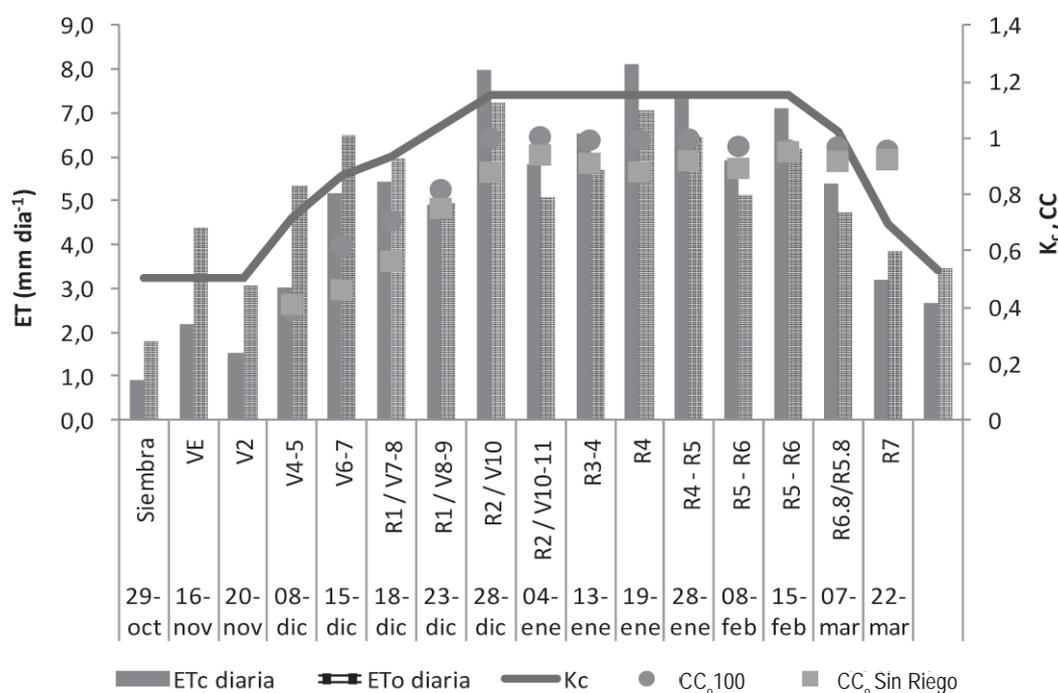


Figura 2. Evolución según el estado fenológico de los valores promedio diarios de ET_o, ET_c, K_c y cobertura del suelo (CC_o) en los tratamientos 100 % y sin riego en la estación experimental INIA La Estanzuela

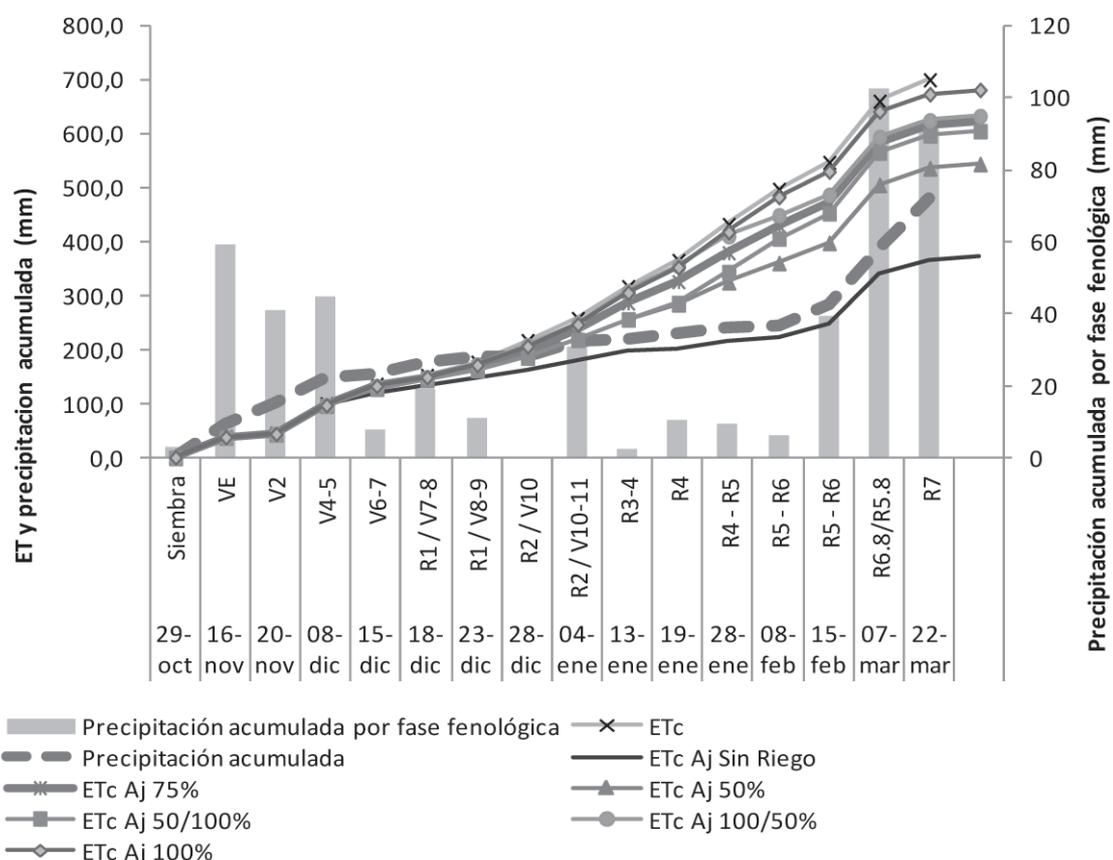


Figura 3. Evolución de la ET_c , ET_{cAj} y precipitación acumuladas durante el ciclo del cultivo y precipitación acumulada para cada etapa fenológica para la estación experimental INIA La Estanzuela.

Allen et al. (1998), quienes identifican a la floración como el momento en donde se alcanza el 80 % de cobertura del suelo.

La ET del cultivo se redujo como consecuencia de las deficiencias hídricas del suelo, ET_{cAj} (Figura 3). Todos los tratamientos excepto el tratamiento sin riego presentaron ET por encima de la precipitación acumulada para todo el ciclo. Cabe recordar que la ET está limitada por el agua disponible (lluvias y riego) (Allen et al., 1998).

Las mayores reducciones respecto a la ET_c sin restricciones fueron del 45 % para el tratamiento sin riego y del 20 % para el tratamiento 50 %. Los tratamientos 100/50 %, 75 % y 50/100 % presentaron reducciones de la ET_c menores al 11 %. Por otro lado, se observa también el aumento en la ET_c en el tratamiento 50/100 % luego de R_4 , momento en el que se cambia la estrategia de riego hacia una situación progresiva de confort hídrico (Figura 3).

La ET_c calculada mediante balance hídrico fue de 682 mm para el tratamiento 100 %, seguida por los tratamientos 100/50 %, 75 % y 50/100 % con 634 mm, 624 mm y 607

mm respectivamente. Los tratamientos 50 % y el tratamiento sin riego tuvieron una ET_c de 545 mm y 375 mm respectivamente (Figura 3).

La diferencia entre la ET_c del tratamiento 100 % y del sin riego fue de 307 mm. La diferencia entre la ET_c máxima y el tratamiento 50 % fue de 137 mm y respecto al 50/100 % fue de 75 mm.

En cuanto al rendimiento, este aumentó con la cantidad de agua agregada evidenciando que el rendimiento en soja es afectado por el status hídrico durante su ciclo, hasta llegar a un máximo. Resultados similares fueron reportados por Specht, Williams y Weidenbenner (1986) y Fereres y Soriano (2007). La respuesta del rendimiento al agua efectiva total se comportó como un modelo lineal plateau (Cuadro 4), con un máximo rendimiento de 5309 kg ha⁻¹ y 584 mm de agua total efectiva. El máximo rendimiento alcanzado fue de 5700 kg ha⁻¹ en el tratamiento 50/100 %, siendo estadísticamente igual al 100 % (Cuadro 2). Los tratamientos 100/50 y 75 % fueron también estadísticamente iguales al 100 %,

Cuadro 2. Rendimiento de grano y contrastes entre tratamientos, INIA La Estanzuela.

Tratamiento	Rendimiento kg ha ⁻¹	Contrastes		
		1	2	3
100/50	5200	0	0	1
75	5050	0	1	0
50	4790	0	0	0
50/100	5700	1	0	0
Sin Riego	3200	0	0	0
100	5444	-1	-1	-1
	P-Valor:	0,75	0,71	0,94

rindiendo 5200 kg ha⁻¹ y 5050 kg ha⁻¹ respectivamente. Los menores rendimientos se encontraron en los tratamientos 50 % y sin riego (Cuadro 2).

Las lluvias ocurridas en el mes de febrero no lograron compensar las pérdidas en rendimiento, consecuencia del déficit hídrico previamente ocasionado tanto para el tratamiento sin riego como para el tratamiento 50 %, los cuales tuvieron menores rendimientos respecto al 100 %, coincidiendo con resultados encontrados por Giménez (2014). Las lluvias sin embargo revirtieron los efectos del déficit principalmente en los tratamientos 75 % y 100/50 %, los cuales no presentaron diferencias en rendimiento respecto al 100 % ($p = 0,71$; $p = 0,94$, respectivamente (Cuadro 2).

La cantidad de agua aplicada por riego para cada tratamiento fue diferente, variando entre 450 mm para el tratamiento 100 % y 225 mm para el tratamiento 50 %. Los tratamientos 50/100 % y 75 % tuvieron cantidades de agua de riego aplicadas muy similares entre sí (342 mm y 337 mm respectivamente). El ahorro de agua de riego respecto al tratamiento 100 %, fue de un 24 % y un 50 % en los tratamientos 50/100 % y 50 % respectivamente.

La capitalización del agua de lluvia (lluvia efectiva) fue distinta entre tratamientos. Los mayores valores de lluvia efectiva ocurrieron para los tratamientos más restrictivos. La cantidad de lluvia no aprovechada por el cultivo estimada mediante balance hídrico varió entre 250 mm y 107 mm para los tratamientos 100 % y sin riego, respectivamente.

En cuanto al agua total efectiva, considerada como el agua aplicada como riego más la precipitación efectiva, varió entre 684 mm a 375 mm registrados para los tratamientos 100 % y sin riego, respectivamente.

Estación Experimental INIA Las Brujas «Wilson Ferreira Aldunate»

El tratamiento 100 % se mantuvo durante todo el periodo con un agotamiento promedio del 23 % y 41 % para las profundidades de 20 a 40 cm y del promedio de 20 a 60 cm respectivamente, por lo que se evidenció un correcto manejo del riego objetivo (Figura 1), a excepción de dos días en febrero en los cuales no se pudo regar por averías en el equipo de bombeo. El resto de los tratamientos de riego se manejaron, de igual forma que en La Estanzuela, con una diferente cantidad de agua de riego en relación a este tratamiento, provocando un déficit progresivo del agua del suelo. El monitoreo de la humedad en el suelo evidenció el manejo de los riegos en los distintos tratamientos (Figura 1).

El seguimiento de los estados fenológicos semanalmente mostró que la fenología no se vio afectada de gran manera por las deficiencias hídricas. Si bien se encontraron ciertas diferencias con los tratamientos más restrictivos, la misma no fue lo suficientemente grande como para establecer diferencias fenológicas diferentes en cada tratamiento.

Como se explicó anteriormente y como se muestra en la Figura 4, la demanda atmosférica estimada a través de la ET_o fue elevada durante diciembre y enero. La ET_c estimada tuvo una evolución en donde se encontró un máximo en el periodo reproductivo desde enero a mitad de febrero, como consecuencia de la evolución del K_c estimado. Teniendo picos de máximo consumo entre R_2 y $R_{4,5}$.

Los muestreos de cobertura y de fenología indican que en R_2 se alcanzó la máxima cobertura. La cobertura para el último periodo no mostró una caída evidente como se esperaba encontrar, ocurrió lo mismo en el cultivo de La Estanzuela.

La evolución de los estados fenológicos tuvo una buena correlación con los estados fenológicos proyectados con el modelo disponible de fenología realizado por Fassio et al. (2013), tanto en La Estanzuela como en Las Brujas. Se encontró que la cantidad de días de las dos primeras fases del K_c , la inicial y la de desarrollo, son menores a las encontradas en La Estanzuela. Esto se debe a que la fecha de siembra más tardía (en Las Brujas) tuvo como consecuencia un acortamiento de estas dos etapas.

La ET_c estimada para Las Brujas varió entre 368 mm y 626 mm para los tratamientos 50 % y 100 % respectivamente. Doorenbos y Kassam (1980), Baigorri, Ciampitti y García (2009) y Giménez (2012) reportan resultados similares. Los tratamientos 75 % y 50/100 % mostraron ET_c similares, 518 mm y 486 mm respectivamente.

La cantidad de agua aplicada por riego para cada tratamiento fue diferente, variando entre 630 mm para el

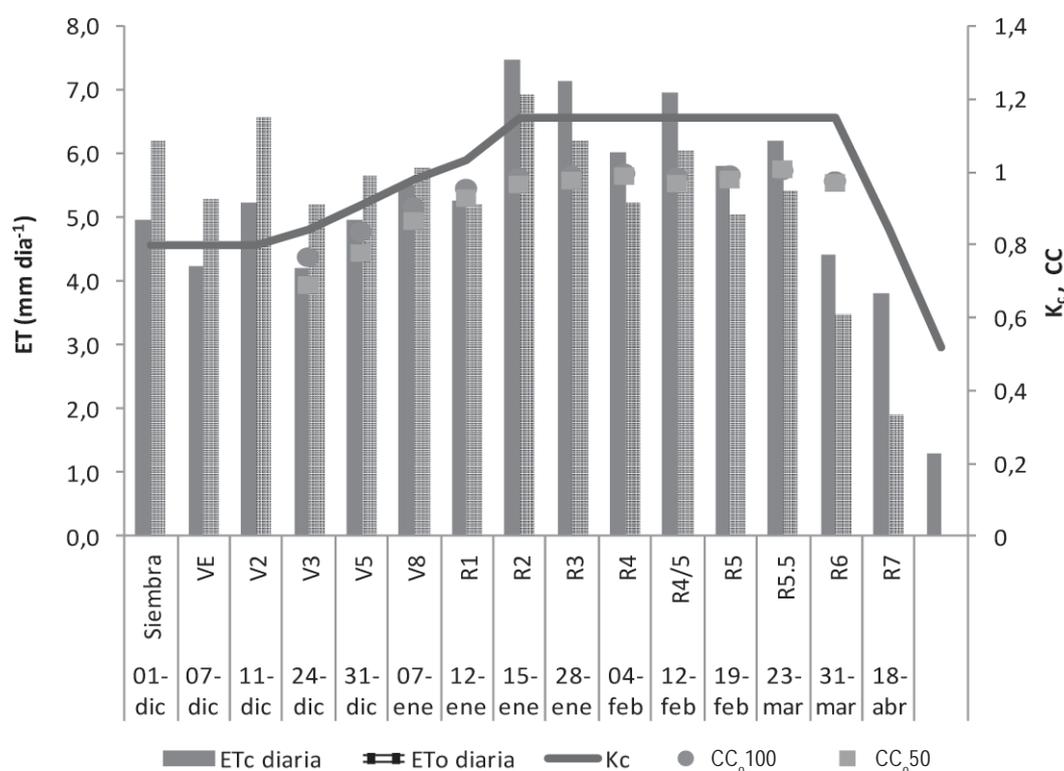


Figura 4. Evolución según el estado fenológico de los valores promedio diarios de ET_o, ET_c, K_c y cobertura del suelo (CC) en los tratamientos 100 % y sin riego en la Estación Experimental INIA Las Brujas.

tratamiento 100 % y 334 mm para el tratamiento 50 %. La diferencia entre los riegos respecto al tratamiento que satisface la demanda del cultivo durante todo el ciclo, el tratamiento 100 %, fue de un 22 y 23 % menos para los tratamientos 50/100 % y 75 % respectivamente. Los tratamientos 50/100 % y 75 % tuvieron cantidades de agua aplicadas muy similares (491 mm y 488 mm respectivamente) pero distribuidas de forma diferente en el ciclo.

Al igual que en el sitio anterior el análisis estadístico muestra que el rendimiento aumentó al incrementar el agua total efectiva ($p = 0,0017$) pero no hubo efecto del momento de riego ($p = 0,47$) al comparar todos los datos. La respuesta del rendimiento respecto al agua total efectiva mostró un comportamiento que permitió el ajuste de un modelo lineal como se muestra en el Cuadro 3. Specht, Williams y Weidenbenner (1986) y Sincik et al. (2008), encontraron respuestas similares al agregado de agua. El máximo rendimiento alcanzado fue para los tratamientos 100 % (4500 kg ha⁻¹) y 50/100 % (3800 kg ha⁻¹), los cuales no fueron estadísticamente diferentes ($p = 0,11$) pese a la mayor cantidad de agua total efectiva del tratamiento 100 % (Cuadro 3). Los rendimientos para los tratamientos 75 % y 50 % fueron

de 3300 kg ha⁻¹ y 2800 kg ha⁻¹ respectivamente. El menor rendimiento se encontró para el tratamiento más restringido, el tratamiento 50 %, en el cual las deficiencias hídricas severas llevaron a reducciones del rendimiento del 38 % respecto al máximo (Cuadro 3).

Los rendimientos en este sitio fueron en general menores a los de La Estanzuela. Según Salvagiotti (2014), la máxima producción de un cultivo está determinada por los factores definidores del rendimiento: la captura de radiación

Cuadro 3. Rendimiento de grano y contrastes entre tratamientos, INIA Las Brujas

Tratamiento	Rendimiento, kg ha ⁻¹	Contrastes	
		1	2
75	3300	0	1
50	2800	0	0
50/100	3800	1	0
100	4500	-1	-1
	P-Valor:	0,11	0,016

y de CO₂, el genotipo y la temperatura. En esta zafra se observó que debido a la siembra más tardía se impidió que el PC coincidiera con la época de mayor cantidad de horas sol. Sumado a esto, el régimen de temperaturas medias fue menor al promedio. Por estas razones es probable que el rendimiento máximo alcanzable para este sitio fuese menor.

Rendimiento en función del agua

La respuesta del rendimiento en función del agua efectiva total para ambos sitios en conjunto se comportó como una función lineal plus plateau, ajustada con un R² de 0,68 (Figura 5). Los resultados indicaron que existió una respuesta lineal al agregado de agua hasta los 590 mm, con un rendimiento máximo de 5000 kg ha⁻¹. A partir de este punto no hay aumentos en rendimientos con mayores agregados de agua, la función llegó a un plateau. Resultados similares fueron reportados por Specht, Williams y Weidenbenner (1986) y Fereres y Soriano (2007). Se encontró que el cultivo de soja tuvo una productividad del agua de 8,5 kg mm⁻¹; estos resultados coinciden con lo reportado por Sawchik y Ceretta (2005).

Los rendimientos para los distintos tratamientos se analizaron mediante contrastes. Los contrastes entre los tratamientos 100/50 % y 50/100 % en relación al 100 % no mostraron diferencias significativas en cuanto al rendimiento, pero sí en cantidad de agua.

Cuando se analizó el contraste para los tratamientos 100 % y 75 % mostró una diferencia significativa entre ambos con un p = 0,058. El tratamiento 75 % en relación al 100 % tuvo una diferencia de rendimiento de 675 kg ha⁻¹. Las diferencias se debieron a que en La Estanzuela, si bien las cantidades de agua fueron distintas entre ambos tratamientos, los eventos de lluvia impidieron alcanzar los agotamientos de agua en el suelo esperados, enmascarando las diferencias entre estos dos tratamientos. A pesar de esto, existió diferencia significativa respecto a la cantidad de agua en relación al 100 %.

Tanto el tratamiento 50/100 % como el 75 % produjeron diferencias en cantidades de agua estadísticamente significativas respecto al 100 %, sugiriendo posibles ahorros de agua. Una cantidad de agua total efectiva muy similar, aplicada en momentos diferentes, tuvo consecuencias en el rendimiento final. Estos resultados son similares a los encontrados por Giménez (2014). Por lo tanto, en las condiciones del sur de nuestro país, podría ser efectiva la estrategia de RDC 50/100 %, realizando riegos deficitarios durante las fases con menor sensibilidad al déficit hídrico, fases previas a R₄, de manera de obtener ahorros de agua sin detrimentos en el rendimiento final.

El peso de mil semillas (PMS) para los tratamientos no fue el componente de rendimiento que determinó la diferencia entre tratamientos, coincidiendo con los resultados encontrados por De Souza, Egli y Bruening (1997).

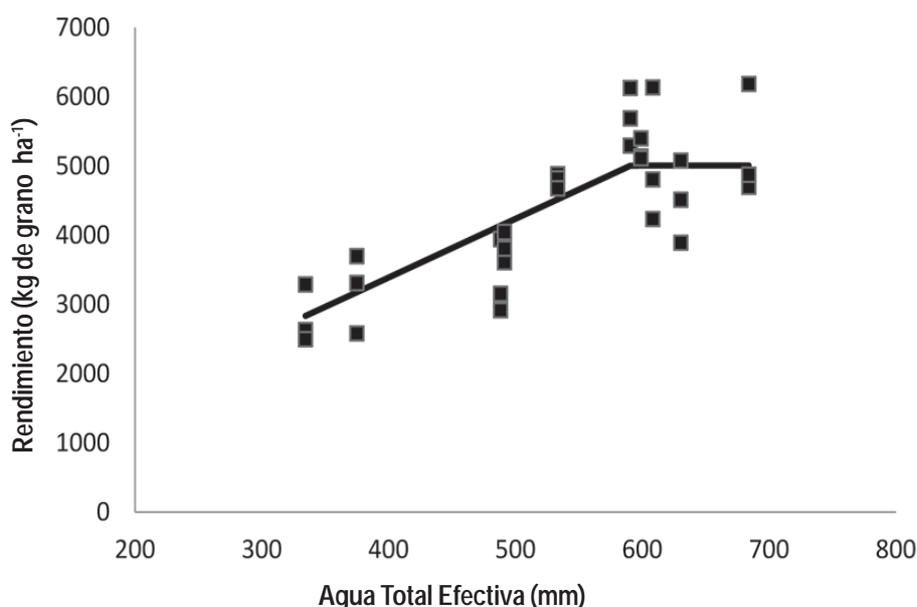


Figura 5. Rendimiento en función del agua total efectiva para dos sitios evaluados. La línea continua representa un modelo lineal plus plateau: para $x < NC$ $y = a + bx$; para $x > NC$ $y = \text{plateau}$.

Cuadro 4. Modelos de predicción del rendimiento de grano en función de la cantidad de agua total efectiva para cada sitio.

Sitio	Predicción de rendimiento (kg ha ⁻¹)	R ²	p
La Estanzuela	Para mm < 584, rendimiento = -580 + 10,1 * mm; Para mm ≥ 584, rendimiento = 5309	0,68	<0,001
Las Brujas	Rendimiento = 5,6995 * mm + 844,41	0,67	0,0011

De acuerdo a la evolución de humedad del suelo en los distintos horizontes se evidenció una extracción de agua por parte de las raíces concentrada entre los 20 y 60 cm de profundidad, sin embargo las deficiencias hídricas severas estimularon al cultivo hacia una extracción de agua a mayor profundidad. Hubo extracciones de agua inclusive en el horizonte de mayor profundidad monitoreada. Estos resultados coinciden con lo reportado por Wani, Heng y Vajja (2012).

Conclusiones

La respuesta del rendimiento en función del agua total efectiva se comportó como una función lineal plus-plateau. El riego aumentó el rendimiento de soja hasta una cantidad máxima de agua total efectiva, a partir de la cual no habría aumentos de rendimiento. En promedio se puede esperar una productividad de 8,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹. Se podría utilizar la estrategia de riego deficitario controlado, de riegos con 50 % de la ETc hasta el estado fenológico R₄, utilizando menor cantidad de agua sin repercusiones en el rendimiento, siempre que los requerimientos hídricos del cultivo sean cubiertos durante el período crítico, desde R₄ hasta R₆ inclusive. Esta podría ser una estrategia válida para manejar el riego en las condiciones climáticas del Uruguay, pudiendo ahorrar hasta un 22 % de agua respecto a satisfacer la demanda completa durante todo el ciclo del cultivo. El agotamiento de agua en el suelo provocó descensos en el rendimiento debidos a un descenso en la ET; la reducción de rendimiento es directamente proporcional a la reducción en la evapotranspiración. El balance hídrico diario siguieron

Cuadro 5. Función de respuesta del rendimiento respecto al agua total efectiva.

Productividad del agua (kg mm ⁻¹)	8,47
Máximo rendimiento (kg ha ⁻¹)	5006
mm de agua total efectiva	590
R ²	0,68

do el protocolo y cálculos descriptos en la Guía FAO N° 56, según Allen et al. (2006) y ajustado con observaciones a campo del desarrollo del cultivo, constituyó una buena herramienta para el manejo del riego.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de estas personas que de distintas maneras contribuyeron al mismo. Entre ellas Rocío Carro, Leonardo Silva, Nicolás Leiva, Marcelo Schusselin, Cesar Burgos, Neru Bentancor, Mario Reineri, Akira Saito, Alejandra Díaz, Ximena Cibils, Silvina Stewart, Deborah Gaso, Ximena Morales, Adrián Cal, Francisco Montoya, Álvaro Otero, Juan Carnelli, Raquel Hayashi.

Bibliografía

- Agorio, C., Cardellino, G., Corsi, W. y Franco, J. (1988). *Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay: I. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total*. Montevideo: MGAP.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO. (Estudio de Riego y Drenaje, N° 56).
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO. (Estudio de Riego y Drenaje, N° 56).
- Andersen, J., Alagarwamy, G., Roiz, C., Ritchie, J. y LeBaron, A. (2001). Weather impacts on maize, soybean and alfalfa production in the great lakes region. *Agronomy Journal*, 93, 1059-1070.
- Andriani, J. (2006). Dinámica del agua en el cultivo de soja. En *Soja: Actualización 2006* (pp. 24-30). Marcos Juárez: INTA. (Informe de actualización técnica, n° 3)
- Andriani, J., Andrade, F., Suero, E. y Dardanelli, J. (1991). Water deficits during reproductive growth of soy beans: I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomy Journal*, 11, 737-746.
- Baethgen, W. y Terra, R. (2010). El riego en un clima cambiante. En *Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas: 1er Seminario Internacional* (pp. 7-18). Montevideo: INIA.
- Baigorri, H., Ciampitti, I. y García, F. (2009). Como crece y se desarrolla el cultivo de soja. En F. García, I. Ciampitti y H. Baigorri (Eds.). *Manual de manejo del cultivo de soja* (pp. 7 - 16). Buenos Aires: International Plant Nutrition Institute.
- Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J. y Aunchayna, R. (2011). *Caracterización Agroclimática del Uruguay-1980-2009*. Montevideo: INIA. (Serie Técnica, N° 193).

- Chalmers, D., Mitchell, P. y van Heek, L. (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(3), 307-312.
- De Souza, P., Egli, D. y Bruening, W. (1997). Water stress during filling and leaf senescence in soybean. *Agronomy Journal*, 89, 807 - 812.
- DIEA. (2016). Producción vegetal. En *Anuario estadístico agropecuario 2016*. Montevideo: MGAP Recuperado en http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_agricola_invierno_2016.pdf
- Doorenbos, J. y Kassam, A. (1980). *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Roma: FAO. (Estudio de Riego y Drenaje, N° 33).
- English, M. (1990). Deficit irrigation: Analytical framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116, 399 - 412.
- Fassio, A., Ibáñez, W., Rodríguez, M., Ceretta, S., Pérez, O., Rabaza, C. y Restaino, E. (2013). *Modelo de predicción fenológica para el cultivo de soja (FENOSoja)*. Disponible en: <http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Utilidades>
- Fehr, W. y Caviness, C. (1977). *Stages of soybean development*. Iowa: Iowa State University. (Special Report, 80). Recuperado de https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR_000g50w214s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf
- Fehr, W., Caviness, C., Burmood, D. y Pennington, J. (1971). Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, 2, 929 - 932.
- Fereres, E. y Soriano, M. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58, 147 - 159.
- García, M., Puppo, L., Hayashi, R. y Morales, P. (2012). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo*. Recuperado de <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/2-seminario-2012/Metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo-a-campo.pdf>
- Giménez, L. (2012). ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar los cultivos en Uruguay? En *Riego en cultivos y pasturas: 2° Seminario internacional* (pp. 33-41). Montevideo: INIA.
- Giménez, L. (2014). Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia (Uruguay)*, 18, 53 - 64.
- Giménez, L. y García-Petillo, M. (2011). Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15, 100-108.
- Haverkamp, R., Vauclin, M. y Vachaud, G. (1984). Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint. *Soil Science*, 137, 78-90.
- Henry, J. (1973). *Uruguay: Evapotranspiration studies*. Paris: UNESCO.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. New York: Elsevier.
- Kadhem, F., Specht, J. y Williams, J. (1985). Soybean irrigation serially timed stages R1-R6: I. Agronomic responses. *Agronomy Journal*, 77, 291-298.
- Karam, F., Masaad, R., Sfeir, T., Mounzer, O. y Roupael, Y. (2005). Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 75, 226-244.
- Puppo, L., García, C., Girona, J. y García-Petillo, M. (2014). Determination of Young olive tree water consumption with drainage Lysimeters. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 841-851.
- Richards, L. (1948). Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*, 68, 95-112.
- Richards, L. (1956). Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20(3), 301-303.
- Salvagiotti, F. (2014). Bases para el manejo nutricional en maíz y soja de alto rendimiento (pp. 37-41). En *Riego en cultivos y pasturas: 3° Seminario internacional*. Montevideo: INIA.
- Sawchik, J. y Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. En: *Jornada técnica de cultivos de verano* (pp. 41-45). Montevideo: INIA. (Serie Actividades de Difusión, N° 417).
- Silva, A., Ponce de Leon, J., García, F. y Duran, A. (1988). Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación (Facultad de Agronomía)*, (10), 20 p.
- Sincik, M., Candogan, B., Demirtas, C., Buyukcangaz, H., Yazgan, S. y Goksoy, A. (2008). Deficit irrigation of soybean [*Glycine Max* (L) Merr.] in a sub-humid climate. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 194, 200 - 205.
- Specht, J., Williams, J. y Weidenbenner, C. (1986). Differential responses of soybean genotypes subjected to a seasonal soil water gradient. *Crop Science*, 26, 922 - 933.
- Torrion, J., Setiyono, T., Graef, G., Cassman, K., Irmak, S. y Specht, J. (2015). Soybean Irrigation Management: Agronomic impacts of deferred, deficit and full-season strategies. *Crop Science*, 54, 2782-2795.
- Wani, S., Heng, L. y Vajja, N. (2012). Soybean. En P. Steduto, T. Hsiao, E. Fereres y D. Raes (Eds.). *Crop yield response to water* (pp. 124-131). Rome: FAO. (Irrigation and drainage paper N° 66).