

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS  
Y RESPUESTA AL RIEGO EN EL CULTIVO DE SOJA**

**Por**

**María Cristina CAPURRO BAZZANO**

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título  
de *Magister* en Ciencias Agrarias  
opción Ciencias del Suelo.

**MONTEVIDEO**

**URUGUAY**

**Julio 2016**

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Mario Pérez, Luis Giménez, Álvaro Otero, Claudio García, el 20 de Julio del 2016. Autor: María Cristina Capurro. Directora: Ing. Agr. Lucía Puppo. Co-director: Jorge Sawchik.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia y amigos, lo más importante que tengo en la vida.

Este trabajo no lo hubiera hecho posible sin el apoyo de personas que de distintas maneras contribuyeron a que este trabajo fuera exitoso. Especialmente a: Rocío Carro, Leonardo Silva, Cesar Burgos, Nicolás Leiva, Neru Bentancor, Marcelo Schusselin, Mario Reineri, Alejandra Díaz, Andrés Beretta, Akira Saito, Claudio García. Ximena Cibils, Silvina Stewart, Graciela Vila, Adrián Cal, Francisco Montoya, Deborah Gaso, Ximena Morales, Álvaro Otero, Jorge Sawchik, Juan Carnelli, Raquel Hayashi, Martín Castro, Victoria Capurro; al equipo de la cátedra de Hidrología y de posgrados de Facultad de Agronomía. Agradezco especialmente a mi tutora Lucía Puppo.

## TABLA DE CONTENIDO

	página
<b>PÁGINA DE APROBACIÓN.....</b>	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....</b>	<b>1</b>
1.1. <b>ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>1</b>
1.1.1. <b><u>La situación de Uruguay</u>.....</b>	<b>1</b>
1.1.2. <b><u>Estrategias de Riego</u>.....</b>	<b>5</b>
1.1.3. <b><u>Crecimiento y desarrollo de la soja según cultivares</u>.....</b>	<b>10</b>
1.1.3.1. <b>Etapas fenológicas y período crítico.....</b>	<b>13</b>
1.1.4. <b><u>Factores ambientales y de manejo que afectan la producción</u>.....</b>	<b>13</b>
1.1.4.1. <b>Respuesta al estrés hídrico en el cultivo de soja.....</b>	<b>15</b>
1.1.5. <b><u>Necesidades de agua del cultivo</u>.....</b>	<b>19</b>
1.1.5.1. <b>Evapotranspiración del cultivo (ETc).....</b>	<b>21</b>
1.1.5.2. <b>Balance de agua en el suelo.....</b>	<b>29</b>
1.1.5.3. <b>Lisimetría.....</b>	<b>30</b>
1.2. <b>HIPÓTESIS DE TRABAJO.....</b>	<b>34</b>
1.3. <b>OBJETIVOS.....</b>	<b>34</b>
<b>2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>.....</b>	<b>35</b>
2.1. <b>INSTALACIONES Y TRATAMIENTOS.....</b>	<b>35</b>
2.1.1. <b><u>Colonia - La Estanzuela</u>.....</b>	<b>35</b>
2.1.2. <b><u>Canelones – Las Brujas</u>.....</b>	<b>38</b>
2.2. <b>MANEJO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>40</b>
2.2.1. <b>Análisis de resultados.....</b>	<b>45</b>
2.2.2. <b>Descripción de la elaboración del balance hídrico diario.....</b>	<b>46</b>
2.2.2.1. <b>Cálculo de la ET<sub>o</sub>.....</b>	<b>46</b>
2.2.2.2. <b>Descripción y elaboración de la curva de K<sub>c</sub>.....</b>	<b>47</b>

2.2.2.3.	Cálculo de la $ET_c$ .....	47
2.2.2.4.	Evapotranspiración ajustada $ET_{c\text{aj}}$ .....	47
2.2.2.5.	Aporte del agua de lluvia y riego.....	48
2.2.2.6.	Zona radicular efectiva.....	48
3.	<b><u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u></b> .....	49
3.1.	<b>LA ESTANZUELA</b> .....	49
3.1.1.	Balance hídrico.....	49
3.1.2.	<b><u>Determinaciones a campo</u></b> .....	51
3.1.2.1.	Población lograda.....	51
3.1.2.2.	Humedad del suelo.....	51
3.1.2.3.	Fenología.....	58
3.1.2.4.	Cobertura del suelo, $ET$ , $K_c$ , precipitación e índice de bienestar hídrico...59	
3.1.2.5.	Altura de planta.....	63
3.1.2.6.	Índice de área foliar.....	64
3.1.2.7.	Conductancia estomática.....	66
3.1.3.	Rendimiento final de grano y componentes.....	67
3.1.4.	Cantidad de agua agregada y productividad del agua.....	71
3.2.	<b>LAS BRUJAS</b> .....	73
3.2.1.	Balance hídrico.....	73
3.2.2.	<b><u>Determinaciones a campo</u></b> .....	73
3.2.2.1.	Población lograda.....	73
3.2.2.2.	Humedad del suelo.....	73
3.2.2.3.	Fenología.....	77
3.2.2.4.	Cobertura del suelo medida, $ET$ y $K_c$ , estimados.....	78
3.2.2.5.	$ET$ medida.....	80
3.2.2.6.	Altura de planta.....	85
3.2.2.7.	Cobertura del suelo por el cultivo.....	86
3.2.2.8.	Conductancia estomática.....	87
3.2.2.9.	Cantidad de agua agregada.....	88

3.2.2.10. Rendimiento final de grano y componentes.....	89
3.3. ANÁLISIS ENTRE SITIOS.....	93
4. <u>CONCLUSIONES</u> .....	98
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	101
6. <u>ANEXOS</u> .....	112
6.1. <u>La Estanzuela</u> .....	112
6.1.1. <u>Caracterización climática</u> .....	112
6.2. <u>Las Brujas</u> .....	118
6.2.1. <u>Caracterización climática</u> .....	118
6.3. <u>Respuesta del rendimiento al agua en el cultivo de soja</u> .....	123

## RESUMEN

En el Uruguay, las condiciones climáticas, la alta variabilidad interanual de las precipitaciones y la capacidad de almacenaje de agua disponible de los suelos determinan que existan períodos donde la demanda por evapotranspiración (ET) supera las precipitaciones, produciendo un déficit hídrico para los cultivos 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 del 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. La técnica de la lisimetría permite medir la ET del cultivo y las reducciones debidas al manejo del riego. Este trabajo se basa en la implementación de las estrategias de riego y sus consecuencias en el cultivo de soja. En dos ensayos se evaluó el impacto de dosis y momentos de riego. En uno de ellos se midió la ET por lisimetría y se calculó el coeficiente del cultivo. Se observó una respuesta lineal plus-plateau del rendimiento respecto al agua total efectiva. El déficit hídrico produjo una importante reducción en la ET y el rendimiento. La técnica de RDC es una alternativa que en nuestras condiciones, permitiría lograr rendimientos máximos con ahorros de agua de hasta un 22 %. La ejecución de un balance hídrico diario siguiendo la metodología descrita por Allen et al. (1998) 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

## SUMMARY

In Uruguay, climatic conditions, interannual rainfall variability and soil water availability determine periods where evapotranspiration (ET) exceeds precipitation. Consequently, available water for crops is reduced and yield losses occur. Irrigation to meet the requirements of ET needs large amounts of water. The irrigation strategy of water application below the requirements for maximum ET is defined as deficit irrigation (DI). This strategy increases water productivity. The technique known as regulated deficit irrigation (RDI), which considers the development stages sensitivity to water stress can improve water productivity even more. The use of Lysimeters allows measuring crop ET and its reduction due to irrigation management. This research analyzes these irrigation practices and their impact on the soybean crop yield. Two trials were evaluated using different doses and irrigation timings. In one of them, ET was measured with lysimeters and crop coefficient was calculated. According to the results there is a linear-plateau response of yields to total effective water. Water deficits caused a significant ET and yield reduction. RDI irrigation strategy showed to be an alternative that in our 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



## **1- INTRODUCCIÓN**

El cultivo de soja es uno de los cultivos anuales con mayor área cultivada en el planeta y proporciona granos con una de los mayores contenidos de proteína (Wani et al., 2012). Representa casi el 50 % de la superficie mundial cultivada, cerca del 56 % de la producción de semilla comestible y 30 % de la producción de aceite. En los últimos 50 años la producción mundial ha aumentado producto del aumento del área cultivada y del incremento de rendimientos medios (Wani et al., 2012).

Los principales productores de soja del mundo son Estados Unidos, Brasil, Argentina, China e India, produciendo estos 5 países más del 93 % de la producción mundial.

### **1.1. ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **1.1.1. La situación de Uruguay**

El sector agropecuario cumple un rol destacado en el desempeño de la economía (MGAP, 2015) y constituye una de las actividades de mayor importancia para el país. Según el anuario de DIEA (2015), las exportaciones agropecuarias representan un 75,8 % de las exportaciones nacionales y dentro de estas, las de productos agrícolas representan 2.677 millones de dólares, un 29 % del total. Poco más de 3 millones de toneladas corresponden a grano de soja, cultivo que encabeza las exportaciones agrícolas del país (DIEA, 2015).

Existen en Uruguay 1.558.000 ha aptas para agricultura y desde el 2001/2002 se ha venido produciendo una gran expansión de los cultivos extensivos en el país. Dentro de estos, el cultivo de soja ha tenido un gran aumento en área sembrada, siendo hoy uno de los principales cultivos agrícolas del país en superficie ocupada,

según DIEA (2015). El cultivo de soja ocupa 1.334.000 ha., representando más del 80 % del área cultivable (DIEA, 2015), produciendo en promedio 2.331 kg ha<sup>-1</sup> de grano (DIEA, 2015), destinado en su mayor parte a la exportación.

El agua se encuentra entre los factores abióticos no controlables de mayor importancia involucrados en la producción (Baigorri et al., 2009). Su disponibilidad para los cultivos depende del clima y de la capacidad de retención de los suelos.

Uruguay se caracteriza por tener un clima templado sub-húmedo (Agorio et al. 1988; Castaño et al., 2011). La precipitación media anual acumulada varía entre 1200 y 1600 mm con una alta variabilidad interanual. Los menores valores se encuentran al suroeste y los máximos al noreste, sin presentar una estación lluviosa ni una estación seca definidas. Sin embargo, el régimen de precipitaciones tiene dos máximos y dos mínimos. Un máximo principal en otoño y uno secundario en primavera; y un mínimo principal en invierno y uno secundario a mitad de verano (Castaño et al., 2011).

La evapotranspiración de referencia (Penman-Monteith) (ET<sub>o</sub>) presenta un claro comportamiento estacional registrando los valores más altos en verano y más bajos en invierno. La ET<sub>o</sub> anual acumulada varía entre 1000 y 1200 mm, con una baja variabilidad interanual (Castaño et al., 2011).

En Uruguay, debido a las características de los suelos se presenta una alta variabilidad en la capacidad de agua disponible. Se encuentran suelos con escaso desarrollo y características asociadas (rocosidad, pedregosidad) que presentan una muy baja capacidad para retener agua en forma disponible, suelos con perfiles más profundos y con clases texturales con mayor proporción de limo o arcilla que favorecen el almacenamiento de agua en el suelo (Molfino y Califra, 2001; Agorio et al., 1988); hasta suelos que presentan una muy alta capacidad de retener agua

disponible, muy profundos y/o suelos aluviales sobre los que se han formado suelo hidromórficos (Molfino y Califra, 2001). Según Agorio et al. (1988) y Sawchik y Ceretta (2005), dentro de los factores del suelo relacionados a la capacidad de almacenaje de agua están los que refieren a la génesis del suelo (textura o profundidad del perfil) y los factores de manejo que afectan la capacidad de recarga de agua, como fecha de siembra, largo del barbecho, cultivo antecesor, estado estructural de los suelos y otros (Agorio et al., 1988).

Debido a lo expuesto anteriormente, en nuestro país se producen períodos de deficiencia hídrica, especialmente desde diciembre a marzo y en suelos superficiales el período se extiende desde octubre hasta abril (Henry, 1973). El agua y su disponibilidad son los factores que explican la variabilidad de los rendimientos entre años (Sawchik y Ceretta, 2005; Andersen et al., 2001, Giménez y García-Petillo, 2011). El impacto en el rendimiento debido al estrés hídrico es la principal limitante de producción de los cultivos estivales en Uruguay (Sawchik y Ceretta, 2005).

De acuerdo a estudios realizados por Henry (1973) en el Uruguay ocurren períodos de déficit hídrico en el suelo, incluso en años normales en cuanto a lluvia (años promedio). Según un análisis realizado por Giménez y García-Petillo (2011) utilizando modelación con una amplia serie climática, observaron que en la mayoría de los años ocurren deficiencias hídricas para soja, encontrando deficiencias máximas de hasta 470 mm en años “niña”. Existen varios estudios en los que se destaca la indudable y altamente deseable incorporación del riego en el Uruguay (Henry, 1973; Agorio et al., 1988, Giménez y García-Petillo, 2011, Giménez, 2012).

Según Baethgen y Terra (2010), la incorporación de riego a un sistema productivo podría disminuir la vulnerabilidad al estrés hídrico, pero resulta fundamental asegurar la fuente de agua.

Los escenarios futuros de precipitación tienen una gran incertidumbre y la distribución de las precipitaciones presenta una gran variabilidad espacial y temporal que dificulta la predicción del clima futuro en los modelos climáticos (Baethgen y Terra, 2010).

En Uruguay hasta el 2011 presentaba una superficie de agricultura con riego de 238000 ha., existiendo en el país una superficie potencial de riego de 1.760.000 ha (FAO, Aquastat, 2015).

Según estudios de proyección del área regada en Uruguay, se estima que la expansión del área de riego permitirá incrementar el Producto Bruto Interno (PBI) del país a través de impactos directos e indirectos. Además de la mayor productividad por hectárea bajo riego, la misma presenta menor dispersión, conduciendo a una mayor estabilidad de ingresos, reduciendo la incertidumbre a la que se expone el productor agropecuario en el proceso de la toma de decisiones (MGAP, 2015).

Los rendimientos de soja promedian entre 2000 y 2.500 kg ha<sup>-1</sup> (con 13-14% de humedad en grano) en la mayoría de los países que lo producen. En Argentina la media es 2880 kg ha<sup>-1</sup> con rendimientos de entre 3000 a 4000 kg ha<sup>-1</sup> en algunas zonas (Baigorri et al. 2009).

La diferencia entre rendimientos máximos alcanzados y los rendimiento promedio en una región pueden deberse a diferentes prácticas de manejo y estatus nutricional en el suelo (Wani et al., 2012). Andersen et al. (2001) encontraron que algunas de las mejoras en rendimientos en las últimas décadas en determinadas regiones responden a mejores condiciones del clima; el agua y su disponibilidad son los factores que explican la variabilidad de rendimientos entre años.

En Uruguay la media ronda los 2300 kg ha<sup>-1</sup> (DIEA, 2015). Pero diferentes trabajos reportan rendimientos potenciales en el cultivo de soja mayor a 5000 kg ha<sup>-1</sup> (Giménez, 2010) hasta 7000 kg ha<sup>-1</sup> (Giménez, 2014a, 2014b); 6000 kg ha<sup>-1</sup>. (Gasó y Capurro, 2015).

### **1.1.2. Estrategias de Riego**

El riego suplementario a las lluvias puede ser una herramienta poderosa que permitiría alcanzar rendimientos potenciales y mantener la productividad, siempre que no haya otros factores limitantes (Henry, 1973; Agorio et al., 1988; Giménez, 2012). Permitiría atenuar los déficits hídricos en años de sequía y estabilizar e incrementar la producción por unidad de área (Fereres y Soriano, 2007).

Según Fereres y Soriano (2007) hasta ahora la estrategia general de riego ha sido la de regar áreas con agua suficiente para satisfacer completamente la ET. Este enfoque viene siendo cuestionado, sobretodo en regiones donde el agua es escasa, por las grandes cantidades de agua requeridas para riego y los efectos negativos que esto tiene sobre la naturaleza. Es por esto que según Fereres y Soriano (2007) se necesita un cambio en la gestión del riego.

Según English et al. (2002), el enfoque de optimización es más complejo que el manejo convencional del riego. Este supone la necesidad de incorporar las funciones de producción de los cultivos de agua y funciones detalladas de costos. Estos autores aseguran que en las próximas décadas, el riego en la agricultura deberá producir más alimentos para una población mundial en expansión. Sin embargo, la creciente dependencia del riego coincidirá con la aceleración de la competencia por el agua por otros sectores y la creciente preocupación por los efectos ambientales del riego. Estas presiones convergentes obligarán a los regantes a reconsiderar las prácticas de riego convencionales.

Conocer la ET de los cultivos resulta fundamental para planificar un proyecto de riego, planificar fuentes de agua, unidades de bombeo, conducción, etc.; con el objetivo de satisfacer las necesidades de los cultivos racionalmente, tanto del punto de vista del uso del recurso como del económico (Agorio et al., 1988). Según Martin et al. (2011) el costo del riego está determinado por la cantidad de agua bombeada y el costo por unidad para aplicarla. Los costos de bombeo pueden disminuir con una adecuada programación del riego, buena eficiencia de aplicación y eficiencia del bombeo y disminuyendo en lo posible la presión requerida para el sistema de riego. Asimismo existen demostraciones a campo en donde se redujo el riego en 38-50 mm solo con el monitoreo del contenido de agua en el suelo, debido a que permitió maximizar el uso del agua almacenada en el suelo y aprovechar mejor las lluvias (Martin et al., 2011).

La agricultura regada tendrá que adoptar un nuevo paradigma en cuanto a la gestión, enfocándose en tener como objetivo la maximización de beneficios económico en lugar que el objetivo de maximizar los rendimientos biológicos. Para esto es necesario identificar estrategias óptimas de riego que requerirán modelos más detallados de las relaciones entre el agua aplicada y la producción de cultivos (English et al., 2002).

Según Fereres y Soriano (2007) el riego es el mayor consumidor de agua del mundo y la competencia de éste por el uso de agua con otros sectores forzaría a operar el riego en condiciones de agua restringida.

En Uruguay, si bien no existe, al menos aún, escasez por este recurso, la limitante radica en las fuentes de agua para riego. Del total de agua de lluvia que cae en el territorio uruguayo, un 60% es interceptada por la vegetación y utilizada en evapotranspiración y recarga de acuíferos; un 40% escurre superficialmente hacia cañadas, ríos, arroyos y océano. Sólo un 3,9% del volumen escurrido

anualmente es aprovechado, por lo cual existe un enorme potencial para la expansión del área regada que todavía puede ser explotado (MGAP, 2015).

La energía en Uruguay es un recurso que debe manejarse con eficiencia (Carnelli, 2010). La mejora en la eficiencia del agua aplicada es otra vía para conservar la energía (Martin et al., 2011).

Según Rosadi et al. (2005) en condiciones de fuentes de agua limitantes, el uso eficiente del agua puede ser alcanzado mediante el uso de nuevas técnicas de riego como programación del riego con riego deficitario. El riego deficitario, debido a que reduce el uso del agua de riego, ayudaría a hacer frente a estas situaciones donde el suministro de agua es restringido.

Según English (1990), la aplicación del agua por debajo de los requerimientos de ET se define como riego deficitario (RD). Éste debe definirse de acuerdo al nivel de reposición de agua respecto a la máxima ET (Fererres y Soriano, 2007).

Una alternativa al RD es el riego deficitario regulado o controlado (RDC). Este concepto fue propuesto por Chalmers et al. (1981) como una estrategia de riego utilizada en frutales, en plantaciones de durazno, para controlar el crecimiento vegetativo. A través del manejo del riego en determinados momentos se lograba un control del crecimiento vegetativo, controlando rebrotes, encontrando que de esta forma se establecía un ahorro de agua sin reducir el rendimiento final.

El RD es una herramienta que permite mejorar la eficiencia de uso del agua, la cual es definida como el ratio entre el rendimiento con riego menos el no regado respecto a la cantidad total de agua aplicada en el ciclo del cultivo. Se puede lograr una mayor mejora en la eficiencia de uso del agua si se considera la sensibilidad de las fases de desarrollo del cultivo al estrés hídrico. En lugar de mantener el riego

manteniendo un porcentaje de agotamiento de agua disponible (AD) constante, podría ser posible ajustar los riegos para hacerlos congruentes con las fases sensibles al déficit hídrico (Torrión et al., 2015).

El riego deficitario produce un déficit hídrico progresivo en el tiempo, debido a una combinación de cantidades reducidas de agua y del agotamiento de la reserva de agua del suelo. Hsiao (1990) introduce también el concepto de riego deficitario sostenible (RDS) llamando así a la técnica en la que se produce lentamente un estrés hídrico que le permite a la planta adaptarse al déficit de agua. Con esta técnica se afecta la expansión de las hojas y la fotosíntesis, reduciendo la biomasa del cultivo, el canopeo y la intercepción de luz. Sin embargo, la partición de materia seca no se ve afectada y el índice de cosecha se mantiene (Ferreira y Soriano, 2007). El riego deficitario debería de diseñarse de manera que el índice de cosecha se mantenga en su nivel máximo y los autores mencionan que se ha encontrado que esto se consigue con riegos suficientes para producir al menos un 60% de la biomasa máxima; sin embargo estos valores pueden cambiar según el cultivo y la variedad, entre otros.

Según Trout et al. (2010), para que el riego deficitario provea beneficios económicos a los productores, debe lograrse una mejora en la eficiencia del uso del agua por el cultivo que maximice el rendimiento de grano por cantidad de agua consumida. Esto coincide con Ferreira y Soriano (2007), quienes aseguran que el principal objetivo no debería ser el de maximizar la producción por unidad de área sino por unidad de agua.

Cuando el riego deficitario es implementado, el cultivo extrae agua desde las reservas de suelo para compensar el déficit. Se pueden desarrollar dos situaciones. Por un lado, que el agua reservada en el suelo sea suficiente como para que la ET no se vea limitada aunque el riego sea reducido. En este caso, el RD no induce



reducciones netas del uso del agua y los rendimientos no se verán afectados. Por otro lado, puede ocurrir que el agua del suelo sea insuficiente para satisfacer la ET. En este caso, tanto el uso del agua como el consumo (ET) se verán reducidos y los rendimientos pueden verse negativamente afectados (Fererres y Soriano, 2007).

La productividad del agua se define como el rendimiento o ingreso por unidad de agua usada en ET (Seckler et al., 2003). La misma aumenta con el riego deficitario en relación al riego que satisfaga la demanda completa (Zwart y Bastiaansen, según Fereres y Soriano, 2007). Esto se debe a que la relación entre la cantidad de agua y el rendimiento obtenido es lineal y positiva hasta un punto en donde la curva se convierte en curvilínea, porque parte del agua aplicada no se usa para ET y se pierde. El rendimiento llega a un máximo y las cantidades de agua adicionales no aumentan si se incrementa la cantidad de agua aplicada.

La respuesta al agua por parte de los cultivos depende de varios factores como la localidad, cultivar y patrones de estrés, fecha de siembra, etc. Cada cultivo tiene distintas sensibilidades al estrés hídrico en distintas etapas de desarrollo y por tanto la programación del déficit hídrico debe estar diseñado para manejar el estrés de tal forma, que la disminución del rendimiento sean minimizado (Fererres y Soriano 2007). En términos generales cuando el declive de los rendimientos es menor que la disminución de ET, la productividad del agua bajo ese tratamiento de déficit hídrico será mayor que el riego para máximos rendimientos.

Specht et al. (1986) y Sincik et al. (2008), encontraron una regresión lineal entre la cantidad de agua suministrada y el rendimiento. Por otro lado, Specht et al. (1986), reportaron que esta relación tendió al plateau para la máxima aplicación de agua.

### **1.1.3. Crecimiento y desarrollo de la soja según cultivares**

La soja es un cultivo sensible a la duración del día o fotoperiodo, clasificada como de día corto ya que la floración se induce cuando la duración del día disminuye, aunque específicamente es la duración de la oscuridad el factor que controla esta respuesta, el mayor número de horas de oscuridad (Doorenbos y Kassam, 1980; Mandl, 1994). La duración del día tiene influencia sobre su tasa de desarrollo.

Cada cultivar tiene una sensibilidad fotoperiódica y un fotoperiodo crítico específico; las diferencias en fotoperiodo crítico es la que llevó a agruparlos en GM (Baigorri et al., 2009). Los cultivares de soja se caracterizan por su grupo de madurez (GM) refiriendo a su largo de ciclo. Los GM son límites arbitrarios que separan una variación continua de longitud de ciclo del cultivo. Se establece una clasificación en 8 GM, del I al VIII; aunque actualmente esta clasificación se amplió a 13 GM (del 000 al X) (Baigorri et al., 2009). Los cambios en latitud modifican el largo de ciclo de cada cultivar, incrementándose a mayor latitud (en el hemisferio sur se alarga cuanto más al sur se lo cultive). Para cada región y latitud existe un rango de GM adaptados, funcionando como ciclos cortos, medios o largos.

En Uruguay dentro de los GM más adaptados se encuentran los grupos V, VI y VII (Mandl, 1994). La época de siembra recomendada se extiende desde mediados de octubre a fines de noviembre. La siembra debe efectuarse en el momento preciso para que los grupos de madurez satisfagan sus requerimientos térmicos y de fotoperiodo para obtener buenos rendimientos (Mandl, 1994).

La floración es determinada según fotoperiodo y temperatura. La floración conviene que ocurra en el período correcto para que no se produzcan mermas de rendimiento (Wani et al., 2012). Solamente entre un 25-60% de las flores producen

vainas y estas se vuelven prominentes una o dos semanas luego de que aparecen las flores. Cuando las condiciones no son limitantes cada vaina produce entre 2 a 4 semillas, las cuales se llenan en aproximadamente un mes (Wani et al., 2012).

La soja se adapta a diferentes sistemas de cultivos y su largo de ciclo puede variar entre 70 a 140 días. Según Giménez (2005), el GM y la fecha de siembra permite variar la longitud del ciclo de cultivo y la ubicación del período crítico. Las características ambientales que ocurran durante el período crítico afectarán el rendimiento de forma significativa.

Cultivares de crecimiento determinado llegan a cobertura máxima del suelo en etapas reproductivas tempranas, mientras que indeterminadas continúan su crecimiento hasta etapas posteriores.

Los cultivares de soja tienen distintas características por la que se diferencian entre sí. El hábito de crecimiento es una de ellas, la cual está condicionada por los requerimientos de largo del día y temperatura de las distintas etapas de crecimiento (Doorenbos y Kassam, 1980; Baigorri et al., 2009). El hábito de crecimiento puede ser determinado, semideterminado o indeterminado.

El hábito determinado se caracteriza por la detención de la formación de nudos y en consecuencia su crecimiento en altura, poco después de iniciada la floración. El tiempo de superposición del crecimiento vegetativo y reproductivo es del 20% del total del ciclo del cultivo (Baigorri et al., 2009).

Por otro lado la soja de hábito de crecimiento indeterminado continúa la producción de nudos sobre el tallo principal luego de comenzar la floración y en consecuencia continúa su crecimiento en altura, pudiendo superar a las variedades

determinadas que presenten el mismo largo de ciclo y fecha de floración (Baigorri et al., 2009; Wani et al., 2012).

Las de hábito de crecimiento semideterminado producen después de floración un número intermedio de nudos respecto a los cultivares determinados e indeterminados que presenten la misma longitud de ciclo (Baigorri et al., 2009).

La altura del cultivo varía según la variedad, sin embargo no existe correlación entre altura de planta y rendimiento (Wani et al., 2012).

En cuanto a las raíces, según Wani et al. (2012), tienen un crecimiento de raíces localizado en los primeros 30-60 cm del suelo pero períodos prolongados de días secos inducen su crecimiento hacia capas inferiores del perfil del suelo. Al igual que para otros cultivos el estrés hídrico aumenta la proporción de raíces y tiende a existir un crecimiento en el largo total de las mismas. Existen diferencias en el crecimiento de raíces según el genotipo. El desarrollo inicial de las raíces es rápido y se nota luego del comienzo de floración. Si bien la raíz pivotante puede alcanzar más de 1,5 m de profundidad y el cultivo podría extraer agua efectivamente de todo el perfil hasta 1,8 m, las raíces no tienden a penetrar horizontes del suelo moderadamente compactos (Doorenbos y Kassam, 1980).

Las altas poblaciones de plantas deben ser evitadas ya que aumenta la competencia radicular llevando a reducciones en diámetro del tallo y mayor altura de plantas, pudiendo haber problemas con el vuelco (fundación Cargill, 1986; citada por Kuss, 2006). Por el contrario, bajas poblaciones de plantas puede tener como consecuencia bajas estaturas de plantas, encontrándose el punto de inserción de las primeras vainas próximo al suelo, acarreando problemas y pérdidas a cosecha. Poblaciones bajas competirán menos con plantas invasoras, pudiendo éste ser otro

factor de reducción a cosecha o mayores costos de producción por aplicación de herbicidas (EMBRAPA, 2002a; citado por Kuss, 2006).

#### **1.1.3.1. Etapas fenológicas y período crítico**

La escala desarrollada por Fehr y Cavines (1971) es la de uso más extendido para definir los estadios fenológicos. Cada estadio está perfectamente descrito y permite identificar las fases con precisión. Los estadios distinguidos por esta escala son: emergencia ( $V_E$ ), etapa de cotiledón ( $V_C$ ), etapa de desarrollo del primer nudo ( $V_1$ ) hasta  $n$  nudos ( $V_n$ ), como etapas vegetativas y de  $R_1$  hasta  $R_8$ , floración a madurez fisiológica respectivamente, como etapas reproductivas.

Según Giménez (2005), el período crítico se define como la/las etapas del ciclo del cultivo en las que las condiciones ambientales desfavorables para el crecimiento y desarrollo afectan en mayor medida al rendimiento de grano, que en relación a otras etapas del ciclo. Según Giménez (2005) las etapas entre  $R_4$  y  $R_6$  son las más críticas para la determinación del rendimiento de grano.

Los meses de enero y febrero presentan las mejores condiciones en cuanto a temperatura y radiación solar para que se ubique el período crítico, sin embargo es en esta época del año que las deficiencias hídricas para el cultivo pueden ser altas (Giménez, 2005).

#### **1.1.4. Factores ambientales y de manejo que afectan la producción**

La soja tiene un crecimiento óptimo en suelos con pH de 6 a 6,5. Es capaz de fijar N atmosférico, atendiendo sus necesidades de N para rendimientos elevados, aunque aplicaciones de N en etapas iniciales son beneficiosas para un buen

crecimiento inicial (Doorenbos y Kassam, 1980; Baigorri et al., 2009). Es un cultivo sensible al encharcamiento y moderadamente tolerante a la salinidad.

La radiación solar tiene influencia en el crecimiento del cultivo durante el ciclo, una mayor radiación solar resulta en mayor fotosíntesis y la tasa de crecimiento del cultivo y el rendimiento dependen de la misma (Baigorri et al., 2009).

La densidad de plantas varía entre 150 a 500.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ , dependiendo de varios factores (Wani et al., 2012). La densidad afecta la radiación interceptada, a mayor cobertura se alcanzan mayores valores de intercepción (Baigorri et al., 2009). En otro sentido siembras tardías generalmente generan coberturas de cultivo reducidos y producen rendimientos menores que las sembradas en fecha (Wani et al., 2012).

El arreglo espacial se define mediante el espaciamiento entre surcos y la densidad de siembra (Baigorri et al., 2009). El cultivo de soja tiene gran capacidad para compensar variaciones de población de plantas, compensando el número de plantas ramificando más o menos, por lo que las variaciones en rendimiento son pequeñas (Mandl, 1994). El espaciamiento entre surcos es el que más influencia tiene sobre el rendimiento, el cierre de entresurcos temprano mejora el aprovechamiento de la radiación solar y competencia con malezas (Baigorri et al., 2009). Según Gaudencio et al. (1990), citado por Kuss (2006), estudiaron poblaciones de plantas entre 280.000  $\text{pl ha}^{-1}$  hasta 650.000  $\text{pl ha}^{-1}$ , y concluyó que la soja sembrada con una amplia variación de población de plantas, altera más su morfología que el rendimiento de granos.

Peixoto et al. (2001), citado por Kuss (2006), estudiaron distintas épocas de siembra y densidades de plantas, no encontrando diferencias significativas en

rendimiento de granos entre las distintas poblaciones, verificando un aumento en la altura de plantas a mayor densidad.

#### **1.1.4.1. Respuesta al estrés hídrico en el cultivo de soja**

El crecimiento y desarrollo durante todo el ciclo del cultivo de soja está controlado por la disponibilidad de agua (Baigorri et al., 2009). El riego incrementa la altura de planta, área foliar, número de hojas y largo de la raíz principal, así como también aumentan la materia seca de tallos, hojas, raíz y órganos reproductivos (Rhine et al., 2009, según Wani et al., 2012).

Las deficiencias hídricas son un factor limitante para la concreción de rendimientos máximos en soja (Ceretta y Saldain, 2005, Sawchik y Ceretta, 2005). Además de los efectos inhibitorios sobre la expansión de las hojas, transpiración y fotosíntesis, el déficit hídrico inhibe la fijación de nitrógeno en soja (Wani et al., 2012).

Diversos autores distinguen respuestas diferentes según la fase del ciclo en la que se produzca el estrés hídrico.

En cuanto al período vegetativo, Todos los cultivos son sensibles al déficit hídrico durante la germinación. Es necesaria una buena disponibilidad de agua (entre 15 a 50 % de agotamiento del agua del suelo). El déficit en estas fases puede tener un efecto muy negativo sobre el rendimiento del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1990).

Riegos para establecimiento del cultivo también son convenientes, sin superar el 85 % ni descender del 50 % del agua disponible en el suelo (Doorenbos y Kassam, 1980).

Durante el período vegetativo las deficiencias o excesos hídricos retrasan el crecimiento (Doorenbos y Kassam, 1980). Sin embargo, algunos autores aseguran que déficits hídricos leves en esta etapa no son un obstáculo para el desarrollo (Wani et al., 2012). Andriani (2006) al igual que los anteriores manifiestan que deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50 % de agua útil en el suelo) hasta  $R_1$  ( $E-R_1$ ), no producen reducciones en el rendimiento, pero pueden reducir área foliar y altura de planta. Déficits mayores (20-40 % de agua útil) podrían producir reducciones del orden del 10 %.

Cuando el suministro de agua es limitado, las reducciones de riego pueden darse durante el período vegetativo y cerca del final de maduración; y deben ser mínimos al final de floración e inicio de formación de granos. (Doorenbos y Kassam, 1980).

En lo que respecta al período reproductivo, desde floración a llenado de grano ( $R_1$ - $R_5$ ), la susceptibilidad a deficiencias hídricas es mayor que durante el período vegetativo, produciendo aborto de flores y vainas. Intensidades medias pueden producir deficiencias del 10 % y deficiencias severas del 20 % o más. Las magnitudes de las reducciones dependen del hábito de crecimiento y la biomasa alcanzada en el período anterior. Existe cierta compensación con el peso de los granos, si la deficiencia hídrica cesa en la etapa siguiente (Doorenbos y Kassam, 1980; Andriani et al., 1991).

Según (Karam et al., 2005), reducciones de agua en  $R_2$  no afectaron significativamente el rendimiento de grano, reflejando mecanismos de compensación efectiva. Esto sugiere que en donde los recursos hídricos son limitados, la disminución o detención del riego en la etapa  $R_2$  puede ser aceptable (Karam et al., 2005).



La eficiencia de uso de agua es mayor cuando el riego se aplica durante la fase reproductiva (entorno a  $R_3$ ) en relación a aplicaciones en etapas previas (Torrion et al., 2015). Sin embargo esta estrategia está limitada a suelos profundos.

Karam et al. (2005) indicaron que el 65 % de la evapotranspiración de la soja ocurre durante el período de llenado de grano, desde  $R_3$  a  $R_5$ , y encontraron mayor sensibilidad al estrés durante este período. Para (Doorenbos y Kassam, 1980, Andriani, 2006; Andriani et al., 1991; Kadhem et al., 1985; Wani et al., 2012) el período más susceptible estaría ubicado más tardíamente, entre  $R_4$ - $R_7$ . En esta etapa la fuerte demanda de asimilados por parte de las semillas detiene el crecimiento del resto de la planta, suspendiendo la exploración de las raíces de la planta, que permitían posponer el estrés hasta entonces. Deficiencias severas en este período pueden producir pérdidas del rendimiento del 40 % o más (Andriani, 2006).

Sin embargo, un aspecto a tener en cuenta es la superposición de las etapas de definición del número de granos y peso de granos durante el ciclo de la soja. La superposición se manifiesta en diferentes posiciones de la planta (mientras se define el número de vainas en los nudos superiores, los granos de las vainas ubicadas en el tercio medio inferior de la planta están en fase activa de crecimiento), e incluso dentro de un mismo nudo (Molino, 2001).

Para asegurar buenos rendimientos, durante llenado de grano el agotamiento del AD no debe ser inferior al 50 % (Doorenbos y Kassam, 1980). El riego durante llenado de grano disminuye la senescencia del follaje (De Souza et al. 1997) y es esperable que ocurra la maduración prematura de tratamientos no regados y con riego deficitario (Torrion et al., 2015; Specht et al., 1986; Wani et al., 2012).

Korte et al. (1983), citado por Kadhem et al. (1985), estudiaron que riego durante  $R_1$ - $R_2$  tuvo poco efecto en el rendimiento, de  $R_3$ - $R_4$  aumentó el rendimiento consistentemente independientemente de las lluvias y durante  $R_5$ - $R_6$  tuvo respuestas altas, moderadas o bajas según las lluvias.

El índice de cosecha (IC) varió entre 32,8 a 36 % según el riego y tuvo una tendencia a ser mayor en el tratamiento sin riego (Sincik et al., 2008). Specht et al. (1986), encontraron también una respuesta al agregado de agua, entre 24 a 48 % de IC.

El rendimiento en soja está asociado principalmente con las variaciones de número de granos por unidad de superficie, componente que se define durante las fases de floración y fructificación (Egli, 1998, citado por Molino, 2001; Karam et al., 2005; Egli et al., 1983 y Snyder et al., 1982, citados por Andriani et al., 1991; Wani et al., 2012). La mayor modificación en el rendimiento se debe al número de vainas  $ha^{-1}$ , mientras que el número de granos vaina $^{-1}$  se mantiene bastante estable (Wani et al., 2012). En el mismo sentido, De Souza et al. (1997), notaron que el estrés hídrico redujo la fotosíntesis con reducciones de número de grano, pero no restringió la movilización de carbono y nitrógeno desde las hojas, evitando que se afectara el peso de grano.

Molino (2001) y Andriani et al. (1991) explican que deficiencias hídricas entre  $R_1$  y  $R_4$ , reportaron reducciones significativas en el número de granos y aumentos significativos en el peso de los granos, sin variación en el rendimiento final con respecto al control sin déficit.

El segundo componente del rendimiento del cultivo más afectado es el peso de los granos. El peso de granos tiene un rango de variabilidad mucho menor que

el número de granos, pero es sensible a la disponibilidad de asimilados luego de floración (Andriani et al., 2004, citado por Molino, 2001).

Reducción de riego en la etapa R<sub>7</sub> no produjo una reducción significativa en número de vainas y el número de granos pero el peso de grano se redujo, Karam et al. (2005), lo que refleja la sensibilidad de este componente de rendimiento al estrés en esta etapa de crecimiento. Sin embargo, la tasa de reducción del peso de grano en la etapa R<sub>7</sub> fue menor que la observada en la etapa R<sub>5</sub>.

Ball et al. (2000), encontraron que altas tasas de crecimiento del cultivo resultaron en un aumento en el número de semillas y biomasa final de planta. Esto se logró con un establecimiento temprano del cultivo.

El efecto del riego sobre el contenido de aceite y proteína en grano es insignificante, aunque con el riego puede aumentar ligeramente el contenido de proteína y disminuir ligeramente el contenido de aceite. (Doorenbos y Kassam, 1980). Otros autores encontraron diferencias variables según los años en contenido de proteína y de aceite entre los tratamientos (Torrion et al., 2015).

#### **1.1.5. Necesidades de agua del cultivo**

Según Allen et al. (1998), las necesidades de agua un cultivo se define como la cantidad de agua que se requiere para compensar la pérdida por ET del cultivo. Si bien los valores de ET del cultivo y de necesidades de agua del cultivo son equivalentes, sus definiciones son diferentes.

Las necesidades de agua del cultivo refiere a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada por el riego o lluvia, y la evapotranspiración del cultivo se refiere

a la cantidad de agua perdida hacia la atmósfera. La necesidad de riego es la diferencia entre necesidad de agua del cultivo y la lluvia efectiva (Allen et al., 1998).

La necesidades hídricas de un cultivo, corresponde a su evapotranspiración (ET) para un ambiente determinado y bajo un manejo concreto del mismo (Pereira et al., 2010).

Dependiendo del clima, suelo, cultivar y prácticas de manejo del cultivo, la evapotranspiración de la soja puede variar entre 300 mm a 800 mm (Doorenbos y Kassam, 1980; Baigorri et al., 2009). Según Torrion et al. (2015), la ET acumulada depende de del número de días entre emergencia y madurez fisiológica (estadio R<sub>7</sub>) y ésta última fecha depende del grupo de madurez (GM) elegido.

La ET máxima diaria para soja es entre 8 y 9 mm y normalmente ocurre cuando se alcanza la máxima cobertura (cerca a máxima floración hasta llenado de grano). Baigorri et al. (2009), reportan consumos de agua de 454 mm con máximos de 7,6 mm día<sup>-1</sup> para Córdoba, Argentina, que se encuentra en una latitud similar a la de Uruguay.

La relación entre producción de biomasa y consumo de agua se encuentra entre 1,2 a 1,6 kg m<sup>-3</sup>, también se ha observado mayor productividad del agua en algunas partes del mundo, debiéndose esta variabilidad a limitantes de nitrógeno u otros nutrientes (Wani et al., 2012). En relación a la producción de grano, Baigorri et al. (2009) encontraron eficiencias de uso del agua en Argentina entre 6,6 a 8,8 kg mm<sup>-1</sup>. Sawchik y Ceretta (2005) encontraron eficiencias de uso del agua entre 5 y 9 kg mm<sup>-1</sup> para soja en distintas localidades en Uruguay.

#### **1.1.5.1. Evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )**

La ET se define como la suma de dos procesos, la transpiración de la cubierta vegetal o cultivo y la evaporación del agua del suelo (Allen et al. 2006, Pereira et al., 2010).

Según Henry (1973) para Uruguay la ET no se encuentra correlacionada con las lluvias, independientemente si llueve mucho o poco, la reducción en ET va a ser dependiente de la reducción en la radiación.

Cuando la superficie evaporante se mantiene mojada, por lluvias o riegos frecuentes, en donde el suelo es capaz de proveer agua que se evapora, este proceso está determinado por las condiciones meteorológicas. Por el contrario, cuando el intervalo entre la lluvia o riego es grande y la capacidad del suelo para satisfacer esa demanda es reducida, entonces el contenido de agua de los horizontes cercanos al suelo se reduce (Allen et al., 1998).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre ambos procesos. En las primeras etapas del cultivo el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero a medida que el cultivo cubre el suelo la transpiración se convierte en el proceso principal (Allen et al., 1998).

Los parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La fuerza evaporativa de la atmósfera puede ser expresada con la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_o$ ).

Según Allen et al. (1998), los factores de manejo y ambientales como la salinidad y fertilidad, enfermedades y plagas, mal manejo debido a otros factores,

pueden limitar el crecimiento del cultivo y por lo tanto reducir la evapotranspiración. También se deberá evaluar la cubierta del suelo, la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo. Si bien el efecto del contenido de agua está determinado por la magnitud del déficit hídrico y tipo de suelo, condiciones de saturación también podría disminuir la capacidad de extraer agua del suelo por inhibición de la respiración y daño del sistema radicular (Allen et al., 1998).

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ ) es la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones hídricas óptimas, con características de manejo y ambientales adecuadas para alcanzar la producción potencial en esas condiciones (Allen et al., 1998, Doorenbos y Pruitt, 1990).

La  $ET_c$  no es simple de medir, una de las formas es a través de la lisimetría. Asimismo existen distintas formas para estimarla, la más generalizada es el doble paso de estimación propuesto por Allen et al. 1998. En esta estimación se calcula la  $ET_o$  a partir de datos climáticos medidos y luego se la corrige por un coeficiente de cultivo ( $ET_c = ET_o \times K_c$ ).

La  $ET_o$  representa la pérdida de agua por evapotranspiración de una superficie cultivada estándar (Allen et al., 2006; Pereira et al., 2010; Doorenbos y Pruitt, 1990). Es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera (Allen et al., 1998). Esta no varía con el tipo de suelo, debido a que si hay abundante disponibilidad de agua, los factores relacionados al tipo de suelo no tienen ningún efecto sobre la  $ET_o$ . De esta forma es posible comparar las  $ET_o$  de distintas localidades y de distintas épocas del año (Allen et al., 1998).

Según Allen et al. (1998) la superficie de referencia o cultivo de referencia es una gramínea de 0,12 m de altura, uniforme, creciendo activamente y bien regado,

cubriendo el suelo completamente. Con una resistencia superficial de  $70 \text{ s.m}^{-1}$ , que corresponde a un suelo moderadamente seco, regado con una frecuencia semanal, y un albedo (radiación solar que es reflejada por la superficie) de 0,23 (Allen et al., 2006).

La  $ET_0$  se puede calcular utilizando los datos meteorológicos utilizando un modelo estandarizado, el método Penman Monteith. Esta ecuación es una representación simplificada y aproximada de los factores físicos y fisiológicos que regulan la ET y proporciona resultados confiables (Pereira et al., 2010).

La fórmula Penman Monteith se ha reportado como la que produce los resultados más exactos y consistentes, tanto en clima árido como húmedos y es el método que se recomienda debido a que existe una alta probabilidad de que prediga correctamente los valores de  $ET_0$  en una amplia gama geográfica y climática (Allen et al., 1998). Este método reduce imprecisiones del método que se usaba anteriormente, el de Penman (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Siendo T como temperatura media del aire a 2 m de altura,  $u_2$  la velocidad del viento a 2 m de altura.

Los coeficientes de cultivo describen las respuestas en términos de pérdida de agua diferencial a la  $ET_0$  de los distintos cultivos en sus distintas etapas (Pereira et al., 2010).

La relación entre  $ET_c/ET_0$  es el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), de manera que la  $ET_c = K_c \times ET_0$  (Allen et al., 1998). La  $ET_c$  difiere de la  $ET_0$  incluso bajo las mismas condiciones climáticas debido a características de anatomía de las hojas,

características de los estomas, propiedades aerodinámicas y albedo; proporción de cobertura del suelo, geometría de la superficie de la vegetación que hace a la resistencia aerodinámica.

Los efectos de las características de los diferentes cultivos están incorporados en el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ). El  $K_c$  no es constante, sino que cambia en función de las condiciones climáticas (Doorenbos y Pruitt, 1990) y de la variación de las características del cultivo durante su ciclo de crecimiento (Doorenbos y Pruitt, 1990, Allen et al., 1998).

Según Allen et al. (1998) y Pereira et al. (2010), el  $K_c$  representa el efecto integrado de cuatro características principales que diferencian a un cultivo en particular respecto al cultivo de referencia (gramínea) (Allen et al., 2006). 1) Altura del cultivo, ya que incide sobre la resistencia aerodinámica de la ecuación Penman-Monteith y la transferencia turbulenta de vapor de agua del cultivo a la atmósfera, rugosidad. 2) Albedo de la superficie del cultivo y del suelo, ya que éste varía según la porción del suelo cubierta por la vegetación y la humedad presente en la superficie del suelo. El albedo determina la fracción de radiación solar absorbida, fuente de energía para la evapotranspiración. 3) Resistencia del cultivo a la transferencia de vapor de agua, la cual depende del área foliar, cantidad de estomas, edad y condición de la hoja, así como también el grado de control estomático; la resistencia de la vegetación incide en la  $r_s$  ( $r_s$  es la resistencia de la superficie, es la resistencia al flujo de vapor de agua del cultivo y el suelo). 4) Evaporación del suelo, el área expuesta de suelo desnudo que depende de la proporción de cubierta vegetal.

Durante el ciclo del cultivo el  $K_c$  varía a medida que el cultivo crece y se desarrolla, al igual que varía la cubierta vegetal del suelo y decae con la senescencia



foliar. Por esto se ha calculado la evolución del  $K_c$  a lo largo del ciclo del cultivo a través de la evolución del IAF efectivo (Pereira et al., 2010).

El  $K_c$  varía a lo largo del ciclo del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1990, Pereira et al., 2010, Allen et al., 2006). La curva de  $K_c$  a lo largo del ciclo agronómico del cultivo se construye atendiendo el grado de cobertura del suelo, su IAF y su altura. El ciclo se puede dividir en etapas:

*-Etapa inicial.* Comprende el período entre siembra y el momento en el que el cultivo alcanza el 10 % de cobertura del suelo. El largo de este período depende del tipo de cultivo, variedad, fecha de siembra y clima. En este momento el  $K_c$  ( $K_{c\ ini}$ ) es alto si el suelo se encuentra frecuentemente humedecido. El  $K_{c\ ini}$  puede estimarse en función del intervalo promedio entre eventos de humedecimiento, el poder evaporante  $ET_0$  y la magnitud del evento de humedecimiento. En sistemas de riego de alta frecuencia con eventos de humedecimiento ligeros, con laminas de 10 mm o menores, para cualquier tipo de suelo, se utiliza el método gráfico descrito en la Guía FAO N° 56, según Allen et al. (1998).

*-Etapa de desarrollo del cultivo.* Comprende desde 10% de cobertura del cultivo hasta alcanzar cobertura completa o 80 %. Para muchos cultivos, la cobertura completa ocurre al inicio de floración. Otra forma de definir cuando se alcanza la cobertura completa es cuando el IAF alcanza un valor de 3. Durante la etapa de desarrollo del cultivo, el valor de  $K_c$  se relaciona con el estado de desarrollo de la planta y la cobertura del suelo.

*-Etapa de mediados de temporada.* Comprende el período entre cobertura completa hasta comienzo de la maduración. El comienzo de madurez está indicado por amarillamiento o senescencia de hojas, caída de hojas o coloración marrón de los frutos. Esta etapa es la etapa más larga para una gran cantidad de cultivos. En

esta etapa el  $K_c$  alcanza su valor máximo ( $K_{c\ med}$ ) y es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y manejos. Las diferencias entre el valor de  $K_c$  en este período y el valor de referencia ( $K_c=1$ ) se deben a diferencias en altura y resistencia.

El  $K_{c\ med}$  presenta valores típicos para cada cultivo. En climas húmedos y de menor velocidad de viento por ejemplo, el  $K_{c\ med}$  es menor. Existe un ajuste del  $K_{c\ med}$  según velocidad de viento, HR y altura del cultivo como se describe en la Guía FAO N° 56, según Allen et al. (1998). A su vez, es de aclarar que el  $K_{c\ med}$  es menos afectado por la frecuencia de humedecimiento que el  $K_{c\ ini}$ .

*-Etapa final.* Comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta cosecha o completa senescencia. El estado de senescencia está asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas debido al envejecimiento, causando una reducción del  $K_c$ . Se asume que el cálculo de la  $ET_c$  finaliza cuando el cultivo es cosechado.

Debido a que el  $K_c$  representa un promedio de la evaporación y transpiración, se utiliza para estimar la  $ET_c$  para períodos de tiempo semanales o mayores, a pesar de que los cálculos puedan hacerse diarios. Existe otro enfoque, el de coeficiente dual del cultivo ( $K_{cb} + K_e$ ) en el cual se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo (Pereira et al., 2010).

Cuando el cultivo se encuentra por fuera de las condiciones óptimas y su transpiración deja de ser máxima, el coeficiente del cultivo se ve afectado por un coeficiente de estrés o de déficit de humedad en el suelo, el  $K_s$ , que es menor a la unidad y reduce su valor (Pereira et al., 2010). Es decir, los efectos del estrés hídrico sobre la ET se manifiestan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo y se logra multiplicando el  $K_c$  por el  $K_s$ . En este caso la  $ET_c$  se reduce y se nombra evapotranspiración ajustada,  $ET_{c\ aj}$ , siendo su cálculo como sigue  $ET_{c\ aj} = K_s * K_c * ET_0$ .

El coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) deberá aplicarse cada vez que el agua disponible desciende por debajo de la fracción de agotamiento permisible ( $p$ ).

La fracción de agotamiento de agua permisible ( $p$ ) de humedad en el suelo es el límite a partir del cual la disponibilidad de agua en el suelo disminuye la transpiración de los cultivos, afectando el rendimiento (Pereira et al. 2010, Doorenbos y Pruitt, 1990). Los cultivos tienen distintas tolerancia términos de tensión de humedad del suelo máxima o grado de agotamiento. El nivel correspondiente de agotamiento de agua disponible en el suelo no deberá superarse especialmente durante los períodos críticos, donde los mismos son sensibles a la tensión de humedad del suelo (Doorenbos y Pruitt, 1990).

El valor de  $p$  está en función del poder evaporante de la atmósfera. Los valores de  $p$  tabulados (en la Guía FAO N° 56) se encuentran referidos a una  $ET_c$  de 5 mm día<sup>-1</sup>. El  $p$  se corregirá cuando  $ET_c$  sea menor a 5 mm día<sup>-1</sup>, aumentando su valor, y cuando sea mayor a 5 mm día<sup>-1</sup>, reduciendo su valor (Pereira et al. 2010). Numéricamente este ajuste se hace mediante la ecuación:  $p = p$  (tabulado) +  $0.04*(5 - ET_c)$ . El valor de  $p$  también es función del tipo de suelo ya que la tasa de extracción del agua por parte de las raíces está influenciada directamente con la energía potencial del agua del suelo (potencial matriz del suelo y la conductividad hidráulica asociada), más que por el contenido de agua.

La fracción de agua del suelo que un cultivo puede extraer sin experimentar estrés hídrico se nombra como agua fácilmente aprovechable, AFA (Doorenbos y Pruitt, 1990, Pereira et al. 2010).

El agua disponible en el suelo ( $AD$ ) considera la capacidad del suelo de retener agua disponible para las plantas, definida como la diferencia entre la capacidad de

campo y el punto de marchitez permanente, considerando una profundidad radicular determinada. El agua disponible es la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular y su cantidad depende del tipo de suelo y la profundidad radicular.

La cantidad de agua retenida en el suelo luego de haberlo saturado y drenado el exceso se denomina capacidad de Campo (CC). Generalmente esto ocurre luego de transcurridos 2-3 días o más para los suelos de textura fina luego de saturación (Burgos y Corsi, 1967).

El punto de marchitez permanente (PMP) es la cantidad de agua que hay en el suelo en el momento que las plantas se marchitan sin poder recuperarse, incluso luego de exponerlas a un ambiente de saturación de humedad de aire durante un período de 24 hs (Burgos y Corsi, 1967).

A medida que aumenta el consumo de agua, el agua remanente en la zona radicular quedara retenida con mayor fuerza por las partículas de suelo, reduciendo su energía potencial y dificultando la extracción de agua por parte de las plantas; hasta llegar a un punto donde la extracción por el cultivo sea nula, llegando al PMP.

Conocer la capacidad de almacenar agua del suelo es esencial para saber su disponibilidad para las plantas y realizar un balance hídrico Silva et al. (1988).

La cantidad de agua en el suelo va disminuyendo debido a la extracción del cultivo, esta cantidad de agua se reduce significativamente antes de llegar al PMP haciendo que la velocidad de extracción por parte del cultivo sea menor a la necesaria para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comienza a sufrir estrés hídrico. Existe un umbral ( $p$ ) para cada cultivo por encima del cual un cultivo extrae agua fácilmente sin experimentar estrés hídrico. Por lo tanto el agua

fácilmente aprovechable de la zona radicular del cultivo lo constituye el agua disponible multiplicada por el  $p$ .

La profundidad que alcanzan las raíces del cultivo no es constante, cambia en las diferentes etapas de desarrollo. A medida que progresa la exploración del suelo por las raíces del cultivo aumenta el agua disponible para el mismo (Agorio et al., 1988).

El coeficiente  $K_y$  es la relación entre el rendimiento de los cultivos y el uso del agua. Doorenbos y Kassam (1980) proponen una ecuación en la que la reducción de rendimiento relativo se relaciona con la reducción relativa de la evapotranspiración.

El factor de respuesta del rendimiento ( $K_y$ ) captura la esencia de los vínculos complejos y esta relación ha demostrado una validez notable, permitiendo un procedimiento viable para cuantificar la efectos de los déficit de agua sobre el rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1980; Wani et al. 2012).

#### **1.1.5.2. Balance de agua en el suelo**

Según Allen et al. (1998), una forma de determinar la ET es medir los componentes del balance de agua en el suelo, evaluar las entradas y salidas de agua de la zona radicular del cultivo en un período de tiempo. El riego ( $R$ ) y las precipitaciones ( $P$ ) son entradas de agua a la zona radicular; parte de estos puede perderse como escurrimiento superficial ( $ES$ ) o por percolación profunda ( $D$ ). El agua puede transportarse por capilaridad ( $C$ ) hacia la superficie, hacia la zona radicular o transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia la zona radicular ( $FS_{in}$ ) o hacia fuera de dicha zona ( $FS_{out}$ ), provocando una variación del mismo ( $\Delta FS$ ), pero estos normalmente son mínimos y no se consideran (Allen et al., 1998).

Según Allen et al. (1998), si todos los flujos pueden ser evaluados, entonces se puede deducir la ET a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo ( $\Delta SW$ ) a lo largo de un período de tiempo:

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

El método de balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos relativamente largos de tiempo, entre 7 a 10 días (Allen et al., 1998).

El conocimiento del balance hídrico del suelo en la zona radicular es fundamental para la buena gestión del riego (Pereira et al., 2010, Silva et al. 1988, Agorio et al. 1988).

La lluvia efectiva es una parte de la lluvia total. Parte de la lluvia total puede perderse debido a escorrentía superficial, percolación profunda o evaporación de la lluvia interceptada por las hojas de las plantas. El agua que no se pierde se define como lluvia efectiva, ya que tiene posibilidad de penetrar en el suelo (Dooerenbos y Pruitt, 1990; Agorio et al., 1988). Cuando existen lluvias intensas puede ocurrir que la eficacia de las lluvias sea baja ya que solo una parte de ella quedará en la rizófera. Existen diversos criterios para estimar la lluvia efectiva.

### **1.1.5.3. Lisimetría**

Las medidas de los lisímetros son medidas de evapotranspiración (ET) representando áreas de entre 0,05 a 40 m<sup>2</sup>. Sin embargo, estas medidas son usadas para caracterizar la ET para grandes áreas, por eso debido a esta extrapolación es primordial que las condiciones vegetativas y ambientales de los lisímetros imiten lo

mejor posible la evaporación de grandes áreas. De lo contrario se puede llegar a conclusiones erróneas (Aboukhaled, 1986, Allen et al., 2011).

Según Allen et al. (2011), los lisímetros pueden agruparse en distintas categorías. 1) Lisímetros de napa de agua constante, que proveen información precisa, de forma semanal o mayor, en áreas donde altos niveles de agua se mantienen al mismo nivel dentro y fuera del lisímetro. 2) Lisímetros de drenaje, en los cuales los cambios en agua almacenada en el suelo son determinados mediante muestreos con sonda de neutrones u otros, donde la lluvia y la percolación son medidos, este tipo de lisímetros se utiliza en localidades donde llueve mucho. 3) Lisímetros de pesada, en los que la ET es determinada por variaciones del peso de la unidad completa mediante una escala mecánica, suspendidos directamente en una célula de carga o soportado hidráulicamente. Si este tipo de lisímetros son manejados adecuadamente, pueden proporcionar los datos más precisos para períodos cortos de tiempo; con la precisión dependiendo de la escala dinámica, el uso de contrapesos y la resolución que tengan las células de carga. La ET puede determinarse precisamente para períodos de 30 minutos con escalas mecánicas. Los lisímetros de pesada con mecanismo hidráulico no son tan precisos para períodos menores a 24 horas debido a efectos de temperatura y presión (Allen et al., 2011).

Los lisímetros son tanques aislados rellenos con suelo en los que el cultivo crece y se desarrolla. El objetivo es aislar la zona radicular y controlar los procesos difíciles de medir que son parte de la ecuación del balance de agua y determinarlos con exactitud. En los lisímetros de drenaje la ET es medida para un período, restando el agua drenada que se recoge del fondo de los lisímetros de la cantidad total de agua. Dentro de los requerimientos de los lisímetros es que la vegetación dentro y fuera de los mismos sea idéntica (Allen et al., 2011).

Los lisímetros deben ser representativos de las condiciones naturales o de campo, el suelo y sus condiciones deben ser esencialmente las mismas dentro y fuera de los lisímetros, para asegurar que la vegetación, la disponibilidad de agua, el vigor y la evaporación desde la superficie del suelo y por tanto la ET sean iguales. El lisímetro debe estar rodeado de la misma vegetación que esté dentro de los lisímetros (Allen et al., 2011).

Según Allen et al. (2011), cuando se calcula la ET se debe considerar el área efectiva de evaporación del follaje y absorción de radiación, que puede llegar a ser mayor que el área física del lisímetro debido a que la vegetación se expandió hacia afuera del lisímetro. La verdadera zona, equivalente a la transpiración del cultivo puede ser complicada de determinar por la no coincidencia de la vegetación dentro y fuera de las fronteras de los lisímetros. La vegetación que se inclina dentro del lisímetro le “roba” energía evaporativa de la vegetación interna, mientras que la vegetación interna que se inclina hacia afuera del lisímetro aumenta la energía evaporativa a través de la intercepción de la radiación solar y la extracción de agua del sistema del lisímetro aumenta. Uno de estos efectos es conocido como efecto “tendedero” donde debido a la naturaleza de la vegetación de dentro del lisímetro, más alta o con mayor área foliar, tanto la transferencia aerodinámica como la radiativa se incrementan, aumentando la ET. Las plantas más altas reciben energía evaporativa, no solo en el plano vertical, sino que recibe radiación desde los lados y además con un incremento substancial en el intercambio turbulento de vapor y calor. Cuanto más chica es el área del lisímetro más pronunciado es el efecto.

Según Allen et al. (2011), se podrían resumir reglas a respetar en el uso de la lisimetría: El borde que rodea los lisímetros debe tener como mínimo 50 m; la vegetación dentro y fuera de los lisímetros debe ser similar en términos de altura, densidad, cobertura y área foliar; el área efectiva del lisímetro debe estar precisamente calculada, el manejo del agua en el lisímetro debe ser muy preciso y



similar al de fuera de los lisímetros; las características térmicas de los lisímetros deben ser similares a las de afuera y el pisoteo debe ser minimizado.

Según Allen et al. (2011), todas las formas de medir la ET tienen algún grado de error. Algunos errores se deben a desvíos en calibraciones, mal funcionamiento de sensores u operativa, colocación del sensor en un lugar poco apropiado, datos guardados incorrectamente, modelo o interpretaciones y procesamientos de datos inadecuados, características de la vegetación no representativas, procedimientos de reducción de datos inadecuado e inadecuada integración con paso del tiempo. A su vez, las medidas pueden tener errores debidos al azar, asociadas a la resolución de lecturas de los sensores, "ruido" electrónica, "ruido" inducido mecánicamente, las respuestas térmicas de los sensores, manejo de la vegetación y del agua del suelo, así como otros errores del azar específicas para el tipo de sistema de medición usado.

Algunos tipos de sistemas de medición de ET son más propensos a la posibilidad de error y algunos tipos de sistemas de medición de ET pueden ser más sensibles a efectos de error en la precisión de medición. Los lisímetros son los que presentan los valores de error más pequeños, seguidos por el Bowen ratio y el balance de energía mediante sensoramiento remoto. Eddie covariance, balance hídrico del suelo y sap flow son los que tienen mayores errores potenciales.

## 1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO

- a) El rendimiento responde a la disponibilidad de agua durante todo el ciclo del cultivo.
- b) El rendimiento está afectado principalmente por la disponibilidad hídrica desde R<sub>4</sub> a R<sub>6</sub> inclusive.
- c) Restricciones hídricas durante vegetativo hasta R<sub>3</sub> inclusive no afectan severamente el rendimiento final, permitiendo un ahorro de agua de riego.

## 1.3. OBJETIVOS

Este trabajo tuvo como objetivos:

- a) Evaluar la respuesta en rendimiento del cultivo de soja, con tres niveles de humedad diferentes durante todo el ciclo del cultivo y una combinación de dos niveles de humedad durante vegetativo hasta R<sub>3</sub> inclusive (momento 1) y desde R<sub>4</sub> a R<sub>7</sub> (momento 2).
- b) Ajustar la función rendimiento-dosis de agua.
- c) Evaluar la utilización del balance hídrico diario según la metodología descrita en la Guía FAO N° 56, como herramienta para predecir las necesidades de riego y generar información local para mejorar su precisión utilizando la técnica de lisimetría.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para realizar este estudio se instalaron ensayos en dos sitios, uno ubicado en Colonia, en condiciones de campo y otro en Canelones, utilizando 12 lisímetros protegidos por una estructura rain-out shelter que impidió el ingreso de agua de lluvia. Ambos ensayos se ubicaron en las Estaciones Experimentales del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), uno en el departamento de Colonia y el otro en el departamento de Canelones, respectivamente. En los dos sitios se realizó un balance hídrico diario para cada tratamiento, siguiendo el protocolo y cálculos descritos en la Guía FAO N° 56. En Canelones además se determinó la evapotranspiración del cultivo de forma directa mediante lisimetría.

### **2.1. INSTALACIONES Y TRATAMIENTOS**

#### **2.1.1. Colonia - La Estanzuela**

En el sitio ubicado en Colonia, el ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental “Dr. Alberto Boerger”, INIA La Estanzuela, Ruta 50, Km. 11, paraje Estanzuela. El ensayo se ubicó en la Unidad del Lago (34° 25' S, 58° 0' W), en un suelo caracterizado como Brunosol éutrico típico (Altamirano et al., 1976).

El ensayo se sembró el 29 de octubre del 2015, luego de una cobertura de avena de 4500 kg MS ha<sup>-1</sup>, con un barbecho de dos meses. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con 3 repeticiones. Las parcelas fueron de 10 m por 4,56 m, sembradas con una distancia entre hileras de 0,4 m.

BI	BII	BIII
T1	T1	T6
T3	T3	T5
T2	T5	T4
T6	T6	T1
T4	T4	T2
T5	T2	T3

Números corresponden a los tratamientos

Figura 1. Croquis del ensayo INIA La Estanzuela

Los tratamientos instalados consistieron en un tratamiento sin riego (T5), un tratamiento en el que se cubrió la demanda completa durante todo el ciclo (100 % de la  $ET_c$ , T6). Dos tratamientos con riego deficitario continuo, satisfaciendo el 75 % de la  $ET_c$  (T2) y el 50 % de la  $ET_c$  (T3). 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 (T1); el otro satisfaciendo durante el momento 1 el 50 % de la  $ET_c$  y en el momento 2 el 100 % (T4) (Cuadro 1).

El momento 1 se definió como el período de tiempo desde siembra hasta que el cultivo culmina el estadio  $R_3$ . El momento 2 se definió como el periodo entre inicios de  $R_4$  hasta  $R_7$ . El inicio de estado  $R_4$ , es el momento en el que se cambia la estrategia de riego en los tratamientos 1 y 4.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos de riego en INIA La Estanzuela

Tratamientos como % ET <sub>c</sub>	
1	100/50
2	75
3	50
4	50/100
5	Sin Riego
6	100

El ensayo se instaló dentro de un área de 1 ha. sembrada con soja, homogénea sin espacios ni caminos marcados. El área circundante presentaba pasturas y soja; de esta forma se buscó evitar un efecto oasis y simular un área de cultivo homogénea extendida.

*Modelo estadístico:*

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \varepsilon_{ij}$$

$Y_{ij}$ : es la variable de respuesta

$\mu$  : es la media poblacional

$\alpha_i$ : es el efecto momento de riego

$\beta_j$ : es el efecto cantidad de agua del i-esimo tratamiento

$\delta_k$  : es el efecto del i-esimo bloque

$\varepsilon_{ij}$ : es el error experimental, asociado al i-esimo momento y el i-esimo bloque

Siendo i: 1, 2

Siendo j: 1, 2, 3, 4, 5, 6

Siendo k: 1, 2, 3

En este sitio se analizó la probabilidad de ocurrencia de lluvias realizando un análisis de frecuencias acumuladas para los meses de 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 y el total de lluvia del mes de enero, donde se dio el período crítico (PC) del cultivo.

### **2.1.2. Canelones – Las Brujas**

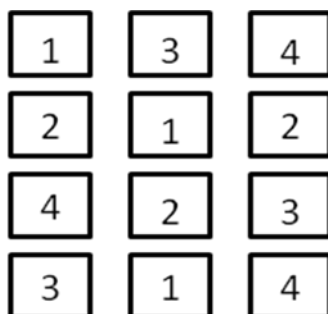
En el sitio ubicado en Canelones, el ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental "Wilson Ferreira Aldunate", INIA Las Brujas, Ruta 48, km 10, paraje Rincón del Colorado. El ensayo se ubicó en los lisímetros instalados dentro de la estructura Rain-out Shelter (34 ° 39' S, 56 ° 19'W). Los lisímetros se rellenaron con el suelo característico del sitio, manteniendo su estructura y secuencia de horizontes. El suelo fue caracterizado como Brunosol éutrico típico (Altamirano et al., 1976). El ensayo se sembró el 1° de diciembre del 2015, con una distancia entre hileras de 0,38 m, con 5 filas dentro de cada lisímetro. El diseño experimental fue en parcelas al azar con 3 repeticiones.

El ensayo se realizó en 12 Lisímetros de drenaje, de 1,9 m x 0,9 m 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. Los lisímetros se encuentran dentro del Rain-out Shelter, estructura construida para evitar los eventos de lluvia. El Rain-out Shelter consiste en una estructura metálica sobre rieles completamente cerrada a los lados y techo a dos aguas. Sus dimensiones son 20 m de largo, 11 m de ancho, altura máxima en la línea media de 8,5 m y mínima de 6 m sobre el perímetro. Dicha estructura se mantuvo siempre abierta y se cerró cuando se presentaron eventos de lluvia por encima de 3 mm. El cierre puede ser de forma automática o manual. Para el cálculo de determinación de la  $ET_c$  y  $K_c$  de los lisímetros se eliminaron los días con lluvia y el posterior.

Inicialmente, durante los primeros 25 días del cultivo el shelter se mantuvo abierto para evitar posibles alteraciones en la plántula.

Los 12 lisímetros se distancian 80 cm entre sí, entre los cuales se sembró soja, al igual que en el área circundante, el área más alejada presentaba pasturas; de esta forma se buscó evitar en lo posible en efecto oasis y simular un área homogénea extendida. En el área interior de los lisímetros se sembró de forma que la distancia de la última fila al borde del lisímetro fuera la mitad de la distancia entre surcos y que la distancia de la última planta al borde del lisímetro en cada fila fuera la mitad de la distancia entre plantas. De esta forma se controló el área efectiva del lisímetro.

El drenaje, en caso de existir, se recolectaba previo a cada riego. La metodología de trabajo sigue las especificaciones y estandarizaciones descritas por Aboukhaled (1986) y Allen et al. (2011).



Números corresponden a los tratamientos

Figura 2. Croquis del ensayo INIA Las Brujas

Los tratamientos instalados fueron: uno satisfaciendo el 100 % de la  $ET_c$  (T1), dos tratamientos con riego deficitario continuo, satisfaciendo el 75 % (T2) y el 50 % (T3) de la  $ET_c$ . Un tratamiento de riego deficitario controlado, satisfaciendo el 100 % de la  $ET_c$  durante el momento 1 y el 50 % durante el momento 2 (T4) (Cuadro 2). Los momentos 1 y 2 fueron definidos anteriormente.

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos de riego en INIA Las Brujas

Tratamientos como % ET <sub>c</sub> :	
1	100
2	75
3	50
4	50/100

*Modelo estadístico:*

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \varepsilon_{ij}$$

Y<sub>ij</sub>: es la variable de respuesta

μ : es la media poblacional

α<sub>i</sub>: es el efecto momento

β<sub>j</sub>: es el efecto cantidad de agua del i-esimo tratamiento

ε<sub>ij</sub>: es el error experimental, asociado al i-esimo momento

Siendo i: 1, 2

Siendo j: 1, 2, 3, 4

## 2.2. MANEJO EXPERIMENTAL

Para cada sitio experimental se realizó la caracterización hídrica del suelo (Cuadro 3). Se determinaron los parámetros punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC) y agua disponible en el suelo (AD). Para determinar CC se utilizó la metodología descrita según García-Petillo et al. (2012) y PMP se estimó mediante la ecuación propuesta por Silva et al. (1988). Se determinaron también los parámetros mediante las ollas de presión según la metodología propuesta por Richards (1948), Richards, (1956), para Las Brujas, determinando las curvas de tensión humedad.



Cuadro 3. Resultado de la caracterización hídrica para INIA La Estanzuela e INIA Las Brujas

Sitio	Profundidad	Dens. Ap. <sup>1</sup>	CC <sup>2</sup>	PMP <sup>3</sup>	AD <sup>4</sup>	mm AD <sup>5</sup>
	cm	g cm <sup>-3</sup>	— — — % volumen — — —			horizonte <sup>-1</sup>
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

<sup>1</sup> Densidad aparente del suelo. <sup>2</sup> Capacidad de Campo. <sup>3</sup> Punto de Marchitez Permanente. <sup>4</sup> Agua disponible del suelo. <sup>5</sup> Cantidad de agua disponible en milímetros según el horizonte del suelo.

El riego se aplicó con un equipo de riego por goteo debido a que ofrece una mayor precisión para la entrega de las cantidades de agua de riego y permite que el experimento ocupe una menor superficie, ambos factores ayudan a minimizar el error experimental en el análisis de los datos (Torrion et al., 2015). Para el riego se utilizaron cintas con portagoteros de polietileno de baja densidad, marca comercial Gi-Teip. En la Estanzuela se utilizaron goteros de 1,6 L h<sup>-1</sup>, autocompensados cada 50 cm. En Las Brujas se utilizaron goteros de 1,4 L h<sup>-1</sup> cada 30 cm. Las tasas de aplicación resultantes fueron: 8,4 mm h<sup>-1</sup> y 12,3 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente. Para el control del agua agregada se utilizaron contadores de hélice marca Arad instalando uno por cada tratamiento.

En ambos sitios se aseguró el control total de malezas, plagas y enfermedades de manera de que éstas no disminuyeran el potencial de rendimiento. Para esto se aplicaron los productos correspondientes cuando se constataba presencia de los mismos. De esta forma se aseguró que las potenciales diferencias en los rendimientos se debieron únicamente a los tratamientos de agua. La variedad utilizada en ambos sitios fue Nidera 4955, de ciclo medio, indeterminada, con una población objetivo de 300.000 pl ha<sup>-1</sup>.

Se realizó fertilización del suelo previo a la siembra cuando fue necesario según análisis químico del suelo (Cuadro 4). En el caso de Las Brujas no necesitó fertilización ya que el suelo estaba en los niveles de suficiencia nutricional. En La Estanzuela, se fertilizó con nitrógeno (N) y fósforo (P) aplicando 200 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante 7/40.

Cuadro 4. Resultado de análisis de suelo para INIA La Estanzuela e INIA Las Brujas

Sitio	pH (H <sub>2</sub> O)	MO <sup>1</sup> %	N-NO <sub>3</sub> <sup>2</sup> µg N g <sup>-1</sup>	P Bray I <sup>3</sup> µg P g <sup>-1</sup>	K <sup>4</sup> meq 100 g <sup>-1</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>5</sup> µg S g <sup>-1</sup>
La Estanzuela	5,8	3,7	2,7	7,8	0,59	0,7
Las Brujas	6,2	2,4	48,6	172,1	0,93	20,1

<sup>1</sup> Materia Orgánica del suelo. <sup>2</sup> Nitrógeno como nitrato. <sup>3</sup> Fósforo determinado con la técnica Bray I. <sup>4</sup> Potasio. <sup>5</sup> Azufre como sulfato.

Los datos climáticos se registraron en estaciones meteorológicas convencionales ubicadas a 1,7 km y 1,4 km de distancia de la localización de los ensayos de La Estanzuela y de Las Brujas, respectivamente. Dentro del shelter se ubicó una estación meteorológica marca Davis para medir viento y temperatura de manera de asegurar que no hubiesen diferencias significativas entre la ET<sub>o</sub> del shelter y la calculada en la estación convencional.

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 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.

Las dosis de riego se determinaron 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.

La población de plantas se determinó en  $V_4$  para asegurar que el número de plantas sea el número de plantas final logrado. Se contó el número de plantas en 4 metros lineales para cada parcela.

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 en los  $K_c$  y del cultivo se realizó a partir de los modelos obtenidos por Fassio et al. (2013a). Esta aplicación web permite a cualquier usuario pronosticar las fechas en que sucederán los eventos fenológicos de sus cultivos. Estas proyecciones eran corregidas a través de la determinación semanal de la fenología en cada parcela y sitio.

Se determinó la humedad del suelo mediante medidas con Sonda de Neutrones marca Troxler 4300 y CPN SG, en La Estanzuela y Las Brujas respectivamente. 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 de sonda se realizaron de 2 a 3 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. Se realizó la calibración para cada equipo siguiendo la metodología de Haverkamp et al. (1984) y Puppo et al. (2014). Para el sitio de INIA La Estanzuela, además de la sonda

de neutrones, se determinó la humedad del suelo utilizando una sonda de capacitancia FDR (Frequency domain reflectometry) marca Delta T, también calibrada de la misma forma. Para esto se instalaron tubos de acceso de 1,10 m de profundidad de fibra de vidrio, colocados en la entrefila del cultivo, al igual que la sonda de neutrones, en todas las parcelas. Las medidas se realizaron al mismo tiempo que la sonda de neutrones (2-3 veces por semana, previo al riego) y las medidas de humedad del suelo se tomaban a los 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm y 1 m de profundidad.

Se determinó para todas las parcelas en ambos sitios las variables altura de planta, cobertura del suelo, conductancia estomática, rendimiento final y sus componentes.

La altura de planta (cm) se consideró como la medida desde el suelo hasta el ápice, tomando 4 a 5 medidas en cada parcela con una regla.

La cobertura del suelo y el índice de área foliar (IAF) se determinó mediante un ceptómetro marca AccuPar, modelo LP-80. Se realizaron medidas semanales, obteniendo 1 dato por parcela que se compone del promedio de 4 medidas. Las medidas se realizaron en torno a las 15 hs, en días sin nubosidad, colocando la barra con los sensores de forma diagonal en la entrefila, como se describe en el manual Accupar (versión 10).

La conductancia estomática se midió con un porómetro marca Decagon. Se realizaron 5 medidas por parcela, tomando las lecturas en la 3° hoja superior o 2° completamente desarrollada. La medida se realizó en el envés de la hoja, donde la soja contiene el mayor número de estomas. Las medidas comenzaban a las 11:30 hs, en días sin nubosidad. Las lecturas se realizaron en plantas similares y hojas

sanas, de la misma forma que Oosterhuis y Walker (1987); Teare y Kanemasu (1972).

El rendimiento final se determinó mediante corte y trilla manual. Las áreas cosechadas variaron entre sitios. El área cosechada en cada parcela del ensayo en La Estanzuela fue de 7,2 m<sup>2</sup>, realizada en tres cortes (sub-parcelas) de 3 filas por 2 m. Se utilizó una cosechadora experimental para la trilla, marca Wintersteiger, Austria. En Las Brujas se cosechó el área completa del lisímetro, 1,7 m<sup>2</sup>, con una trilladora experimental marca Warnig Ls 92239130, Estados Unidos. El peso de grano se corrigió en base a una humedad del 14 %.

Los componentes de rendimiento determinados fueron: el número de vainas por planta, número de granos por vaina y planta, granos m<sup>-2</sup>, y peso de mil semillas. Para el peso de mil semillas (PMS) se consideraron 1500 semillas en cada parcela de La Estanzuela (llevadas a peso de mil semillas por regla de tres) y 1000 semillas en cada parcela para Las Brujas. Para la determinación del número y peso de los granos se utilizó un contador electrónico marca Reign, modelo SLY-C, corregido a 14 % de humedad. El resto de los componentes de rendimiento se realizó en base a una muestra de 1 m lineal por parcela, en ambos sitios.

### **2.2.1. Análisis de resultados**

Para el análisis de resultados se realizó un análisis estadístico utilizando el software Infostat/P. Se realizó un análisis de varianzas (ANAVA) 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 planteó el contraste entre los tratamientos 75 % vs 50/100 % debido a que ambos presentaron una cantidad similar de agua total efectiva pero aplicada en distintos momentos. Para los análisis de varianza se consideró al momento de riego como variable discreta y la cantidad

de agua como variable continua. En el ANAVA del sitio La Estanzuela y en el conjunto de ambos sitios también se incluyó el efecto bloque. Para el ANAVA conjunto de ambos sitios, se consideró al sitio Las Brujas como un cuarto bloque.

En La Estanzuela el aumento de rendimiento en función del agua total efectiva se modeló como una función lineal plus plateau y en Las Brujas se modeló como una función lineal. Para estos ajustes se utilizaron las herramientas análisis de datos y solver de software Microsoft Excel.

### 2.2.2. Descripción de la elaboración del balance hídrico diario

Para el balance hídrico diario se utilizó una hoja de cálculo electrónico con un programa de fácil uso y acceso como el programa Excel (Figura 3).

Fecha	ET <sub>0</sub>	Kc	ETc	pp	Riego neto	Déficit acumulado inicial de Humedad en Suelo	Déficit acum	Prof. Radicular	Prof. Mojada	AD en prof. Mojada	p	AFA	Ks	ETcaj	ETcaj / ETc
16-ene	5.8	1.15	6.7	0	12.3	3.8	3.8	0.25	0.25	39.5	0.3	13.1	1.0	6.67	1.00
17-ene	6.6	1.15	7.6	0	0	11.4	11.4	0.25	0.25	39.5	0.3	11.7	1.0	7.59	1.00
18-ene	6.3	1.15	7.2	0	12.3	6.3	6.3	0.25	0.25	39.5	0.3	12.2	1.0	7.25	1.00
19-ene	6.4	1.15	7.4	0	0	13.3	13.3	0.25	0.25	39.5	0.3	12.1	1.0	7.02	0.95
20-ene	2.6	1.15	3.0	0	12.3	4.0	4.0	0.25	0.25	39.5	0.5	19.0	1.0	2.99	1.00
21-ene	6.8	1.15	7.8	0	0	11.7	11.7	0.25	0.25	39.5	0.3	11.3	1.0	7.71	0.99
22-ene	7.6	1.15	8.7	0	12.3	8.2	8.2	0.25	0.25	39.5	0.3	9.9	1.0	8.74	1.00
23-ene	3.8	1.15	4.4	0	12.3	4.4	4.4	0.25	0.25	39.5	0.3	11.3	1.0	4.40	1.00
24-ene	4.8	1.15	5.5	0	0	11.1	11.1	0.25	0.25	39.5	0.3	11.3	1.0	5.13	0.98

Figura 3. Croquis del balance hídrico en Excel.

#### 2.2.2.1. Cálculo de la ET<sub>0</sub>

La ET<sub>0</sub> se determinó según la ecuación de Penman Monteith. Los procedimientos de cálculo se encuentran detallados en la Guía FAO N° 56 descrita por Allen et al. (1998). El método Penman-Monteith se recomienda como el método más adecuado en la determinación de la ET<sub>0</sub> con parámetros climáticos, como se explicita en la sección anterior.

Los valores de la ET<sub>0</sub> se pueden calcular con los datos de la estación climática o encontrar disponibles en la página web de INIA

(<http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico>), donde se pueden descargar los valores diarios para las zonas de influencia de las estaciones climáticas INIA. En este caso se realizó por ambas vías.

#### **2.2.2.2. Descripción y elaboración de la curva de $K_c$**

La elaboración de la curva de  $K_c$  se describe en la Guía FAO N° 56, según Allen et al. (1998). Se dividió el período de crecimiento del cultivo en 4 etapas generales según fenología y desarrollo, estimando su duración en base al modelo de fenología de Fassio et al (2013a), corregidos semanalmente con las observaciones a campo y mediciones de porcentaje de cobertura del suelo (CC) e índice de área foliar (IAF). Se usaron los valores de  $K_c$  de Allen et al. (1998) que corresponden a dichas etapas ( $K_{c\text{ ini}}$ ,  $K_{c\text{ med}}$  y  $K_{c\text{ fin}}$ ). Para el  $K_c$  inicial de Las Brujas se utilizó el método gráfico según frecuencia de humedecimiento y condiciones climáticas.

#### **2.2.2.3. Cálculo de la $ET_c$**

A partir de la curva del  $K_c$  se determina la evapotranspiración del cultivo,  $ET_c$ , multiplicando los valores de  $ET_o$  por el  $K_c$ .

En los tratamientos con riego deficitario se consideró un  $K_s$  y se modificó la  $ET_c$  diaria, definiendo y construyendo la evapotranspiración del cultivo ajustada ( $ET_{c\text{ aj}}$ ) como se muestra a continuación.

#### **2.2.2.4. Evapotranspiración ajustada $ET_{c\text{ aj}}$**

Siendo  $ET_{c\text{ aj}} = ET_o * K_s * K_c$

$K_s$  diario es el factor de reducción de la transpiración del cultivo; definido como:  $K_s = (AD - \text{Agotamiento de agua}) / (AD - AFA)$ .

Como forma de medir las restricciones hídricas de los tratamientos se calculó el índice de bienestar hídrico como la relación entre la  $ET_c$  aj y la  $ET_c$  máxima estimadas.

#### **2.2.2.5. Aporte del agua de lluvia y riegos**

Una vez establecida la demanda del cultivo, se le restaron los aportes de agua diarios, estableciendo un balance. Se asumió que las lluvias como máximo pueden devolver el suelo a CC y el resto percola. En los lisímetros el drenaje estuvo contabilizado previo a cada riego.

#### **2.2.2.6. Zona radicular efectiva**

Se considera una profundidad radicular, donde se presentan la mayor parte de las raíces efectivas del cultivo. Dicha profundidad aumenta a medida que el cultivo se desarrolla hasta llegar a un máximo. En las etapas iniciales del cultivo se considera una profundidad de 20 cm, ya que se considera que el agua se mueve por capilaridad, como se describe en la Guía FAO N° 56, según Allen et al. (1998).

En los lisímetros se calculó la  $ET_c$  para el tratamiento 100%, (T1) con la fórmula:

- $ET_c = \text{Riego} - \text{Drenaje} \pm \Delta \text{humedad del suelo}$

Siendo la variación de humedad la diferencia entre dos medidas con sonda de neutrones.



### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados que se exponen a continuación se muestran para cada uno de los sitios de experimentación y luego se presenta un análisis conjunto de ambos.

#### **3.1. LA ESTANZUELA**

Las condiciones ambientales produjeron condiciones de alta demanda, 252 mm y 475 mm de  $ET_0$  para los períodos desde siembra a  $R_1$  y desde  $R_1$  a  $R_7$  y 316 mm desde  $R_4$  a  $R_7$ . El período reproductivo y gran parte del período crítico (PC), coinciden con los momentos de menor precipitación acumulada. Desde  $R_1$  hasta el período cercano a  $R_6$  se registraron 70 mm de lluvia acumulada (desde el 18 de diciembre al 11 de febrero). Desde el 11 de febrero ( $R_5$ ) hasta  $R_7$  se registraron 233 mm acumulados. Las precipitaciones estuvieron concentradas en la última fase de PC. La información climática de la zafra se encuentra detallada en Anexos.

El análisis de las frecuencias acumuladas con los datos históricos 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 nuestras condiciones (Sur del Uruguay) existe un 80% probabilidad de que lluevan más de 240 mm en este período (cantidad de agua acumulada en esta zafra, desde noviembre a enero). Por otro lado, las precipitaciones de enero fueron particularmente bajas (42 mm). El análisis de frecuencias acumuladas muestra que existe un 92% de probabilidad de que lluevan más de 50 mm en este mes, donde ocurrió el PC.

##### **3.1.1. Balance hídrico**

A continuación se presentan a modo de ejemplo los resultados que surgen del balance hídrico realizado en los tratamientos 100 % y del tratamiento sin riego

(Figuras 4 y 5). En estas Figuras se evidencia un correcto manejo del riego en el caso del tratamiento 100% y un déficit acentuado para el tratamiento sin riego desde fin de diciembre hasta principios de febrero.

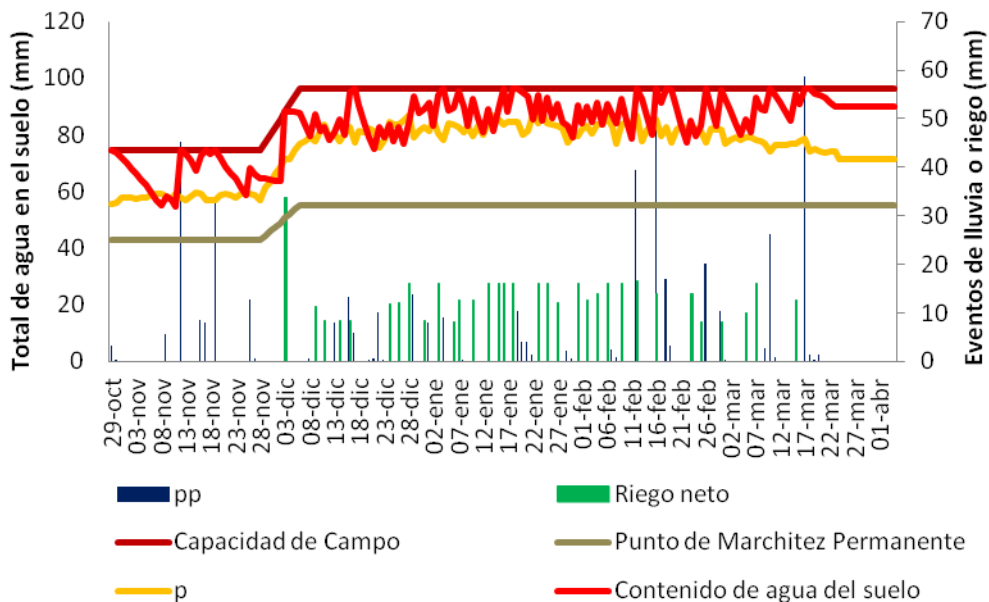


Figura 4. Evolución del balance hídrico para el tratamiento 100 % en La Estanzuela

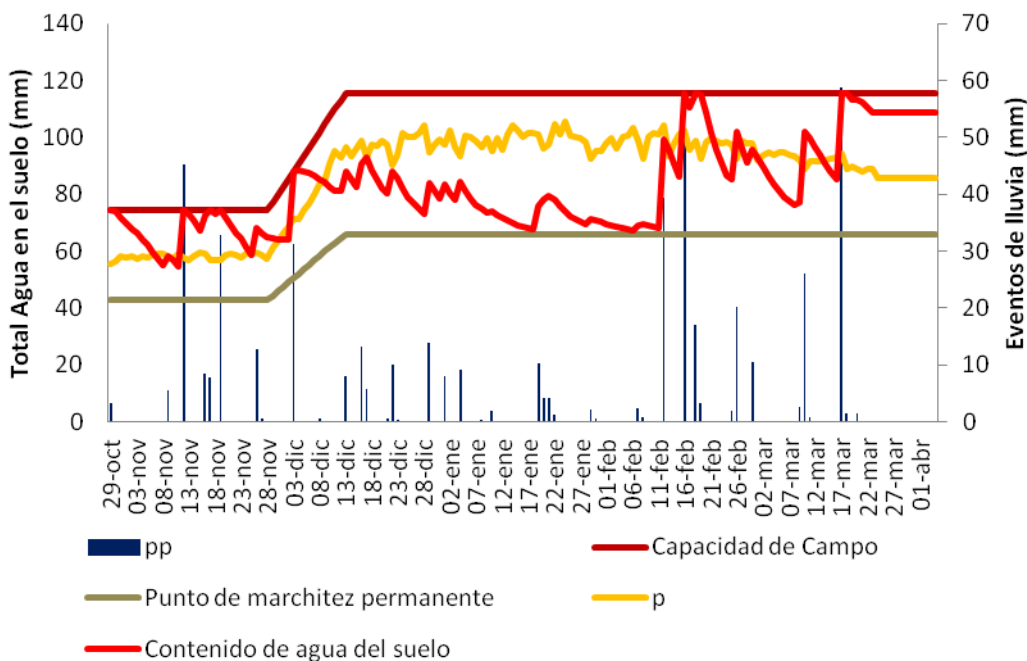


Figura 5. Evolución del balance hídrico para el tratamiento sin riego en La Estanzuela

### **3.1.2. Determinaciones a campo**

#### **3.1.2.1. Población lograda**

La población lograda en La Estanzuela fue de 268.000 pl ha<sup>-1</sup> promedio. Si bien en promedio la población lograda fue un 11 % menor a la objetivo, es importante destacar que la siembra fue uniforme, con equidistancia entre plantas, situación que definió una siembra de calidad.

Según Fassio et al. (2013b) y Gaso et al. (2014), existe un rango crítico de población mínima de 150.000 a 200.000 pl ha<sup>-1</sup> por debajo de la cual el rendimiento se ve afectado. La población lograda supera en un 34 % el nivel máximo del rango crítico.

#### **3.1.2.2. Humedad del suelo**

La humedad del suelo se determinó mediante dos formas, con sonda de neutrones y con sonda FDR.

Las medidas de contenido de humedad del suelo determinada 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. Los valores obtenidos podrían estar subvalorando el contenido de humedad en esta profundidad, a pesar de haber realizado una calibración específica para esta profundidad. 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.

Como se aprecia en la Figura 6, el tratamiento de riego 100 % mantuvo el contenido de humedad del suelo con valores iguales o mayores al 50 % del agua disponible (AD) en los tres horizontes restantes por lo que se evidencia un correcto manejo del riego. El resto de los tratamientos de riego se manejaron con un agregado de agua inferior a este tratamiento causando un déficit hídrico progresivo como se muestra en la Figura 7 y Figuras 40, 41 y 42 en Anexos, con mínimos durante el PC.

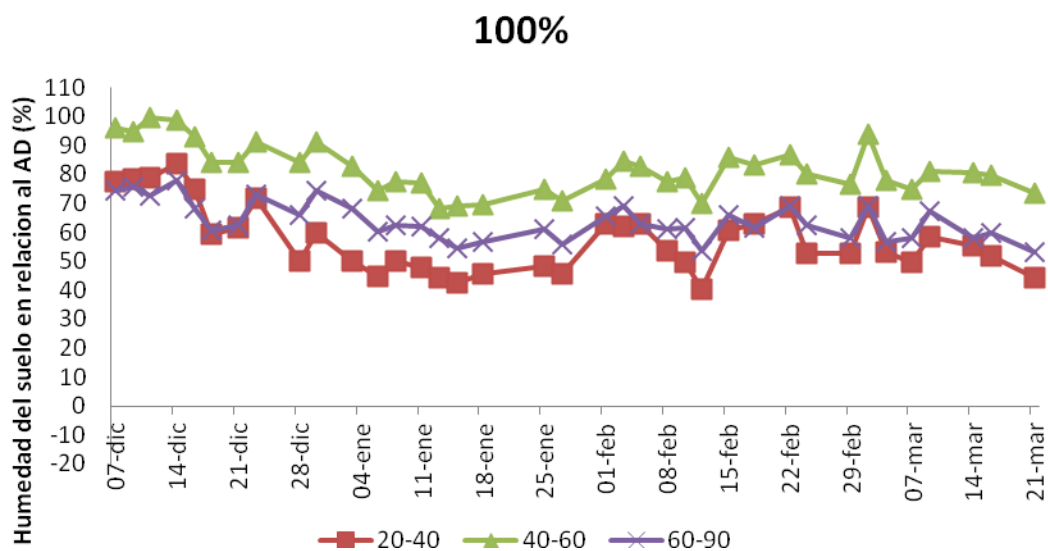


Figura 6. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 100 % en La Estanzuela

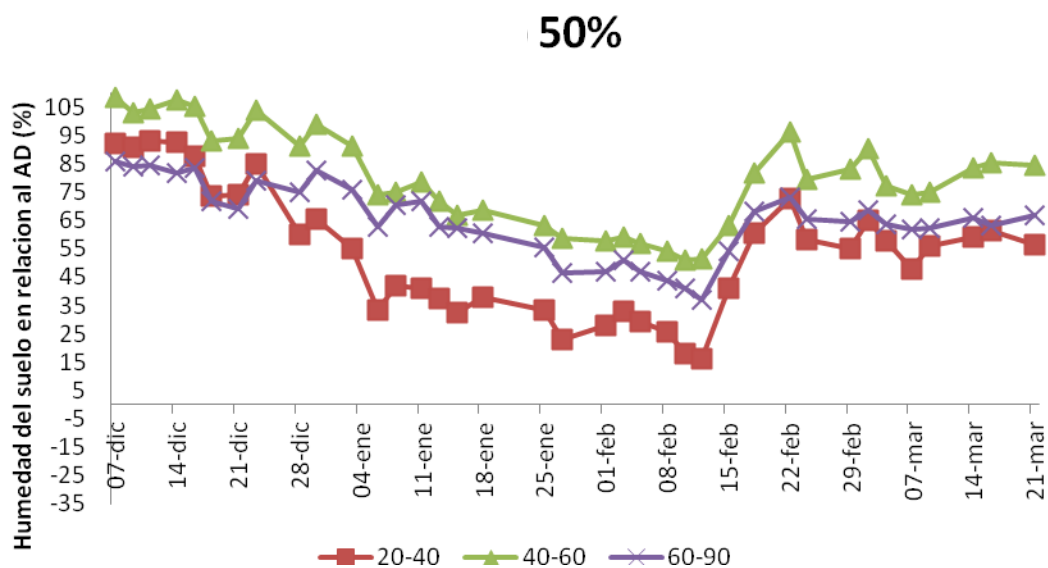


Figura 7. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 50 % en La Estanzuela

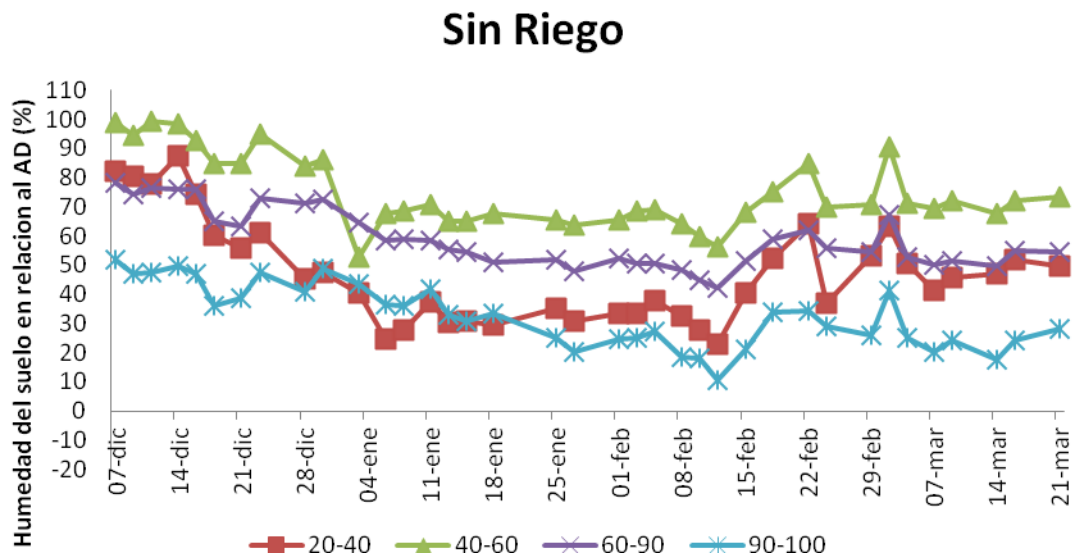


Figura 8. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento Sin Riego en La Estanzuela

Con los datos de sonda de neutrones se calcularon los agotamientos de agua disponible (p) en los horizontes del suelo monitoreados y durante el ciclo del cultivo. El p en los tratamientos de riego deficitario descendió progresivamente pero se revirtió parcialmente cuando se produjeron precipitaciones. Las condiciones de mayor agotamiento se encontraron durante el PC.

Cuadro 5. Agotamientos promedio del agua disponible según horizonte y días transcurridos durante fase fenológica para La Estanzuela

Tratamiento	Agotamiento promedio 20-60 cm	N° días	Fenología
	------(%)-----		
100/50	57	11	R <sub>4.5</sub> a R <sub>5.5</sub>
75	60	3	R <sub>5.5</sub>
50	59	18	R <sub>4.5</sub> a R <sub>5.5</sub>
50/100	60	4	R <sub>4.5</sub>
Sin Riego	52	40	R <sub>2</sub> a R <sub>5.5</sub>
100	30	Todo el período	

Los mayores agotamientos en todas las parcelas se registraron en el horizonte de 20 a 40 cm, sin embargo la humedad en el horizonte 40 a 60 cm sigue un patrón de agotamiento similar al anterior, pero manteniendo valores de humedad mayores. Esto estaría sugiriendo que la mayor concentración de raíces absorbentes se encuentra entre los 20 y 60 cm de profundidad (Figuras 6, 7 y 10).

El tratamiento 100 % llegó al inicio del PC (19 de enero) con un agotamiento del AD del 42 % de 20 a 60 cm de profundidad, pero durante todo el ciclo se mantuvo alrededor de 30 % de agotamiento de 20 a 60 cm (Cuadro 5). Durante el PC (del 19 de enero al 22 de marzo) el p se mantuvo en un 45 % en promedio.

Desde floración hasta R<sub>5</sub>-R<sub>6</sub> las condiciones ambientales determinaron una mayor ET del cultivo y produjeron el mayor agotamiento del AD en todos los tratamientos.

El tratamiento 100/50 %, tuvo un pequeño déficit a partir de  $R_4$ , al reducir el riego de acuerdo al tratamiento (Figura 40 en Anexos), pero a mediados de febrero ocurrieron períodos de lluvias que dieron a este tratamiento condiciones benignas a partir de  $R_{5.5}$ . Entre el 12 de febrero y el 28 de febrero llovieron 131 mm, que permitieron la recarga del perfil de suelo. De todas formas, este tratamiento presentó un agotamiento del AD promedio para 20-60 cm de 57 % durante 11 días, entre  $R_{4.5}$  a  $R_{5.5}$ . (Cuadro 5). Por cuanto el estrés impuesto al cultivo con este tratamiento, fue moderado y como se verá más adelante no afectó el rendimiento.

Las lluvias también beneficiaron al tratamiento 75 %. Este tratamiento el 3 de enero ( $R_2$ ) presentaba un p del 50 % y llegó a un nivel máximo el 12 de febrero ( $R_5$ ). Presentó un agotamiento promedio durante 3 días en torno a  $R_{5.5}$  del 60% entre 20 y 60 cm (Figura 41 en Anexos, cuadro 5).

El tratamiento 50 % tuvo un déficit un poco mayor al tratamiento 75 %, que comenzó el 6 de enero hasta el 12 de febrero. Este tratamiento presentó a inicios de enero ( $R_2$ ) un p del 45 % y partir de esta fecha dicho p fue aumentando progresivamente hasta llegar a un nivel máximo el 12 de febrero ( $R_5$ ), (Figura 7). El agotamiento superó el umbral teórico del 50 % de agotamiento (según Allen et al., 1998; Pereira et al., 2010) durante 18 días, presentando un agotamiento promedio de 59 % durante el PC, de  $R_{4.5}$  a  $R_{5.5}$  (cuadro 5). Esto se manifestó en el rendimiento, aunque a partir del 12 de febrero la humedad en el suelo aumentó a causa de las lluvias.

La evolución del AD para el tratamiento sin riego (Figura 8) mostró una evolución igual a la calculada en el balance hídrico (Figura 5), con mínimos en el mes de enero y febrero. Este tratamiento fue el que presentó las condiciones de agotamiento más severas. Al inicio de la etapa reproductiva ( $R_2$ ) el tratamiento sin riego fue el que presentó el mayor agotamiento del AD, 54 % de 20 a 60 cm. Se

mantuvo relativamente estable en ese rango (52 % promedio) durante 40 días hasta R<sub>5,5</sub> (Cuadro 5). El agotamiento si bien alcanzó niveles similares a los del tratamiento 50 %, se mantuvo por más tiempo con ese nivel máximo de agotamiento alcanzado.

El tratamiento 50/100, tuvo un déficit similar al tratamiento 50 % durante el período en el que los riegos deficitarios fueron iguales. Este tratamiento presentó agotamiento promedio durante 4 días en torno a R<sub>4,5</sub> del 60 % de 20-60 cm (Cuadro 5, Figura 42 en Anexos).

Los resultados de las medidas de humedad de suelo con la sonda FDR en términos absolutos no se ajustaron con los registrados por la sonda de neutrones, a pesar de haber realizado su calibración con el método gravimétrico de la misma forma que con la sonda de neutrones. Sin embargo, la evolución de la humedad registrada por ambos métodos sigue el mismo patrón.

Este método permite visualizar con mayor detalle la extracción de agua por parte de las raíces y en forma indirecta su desarrollo, debido a la posibilidad de registrar la humedad en seis profundidades diferentes. (Figuras 9, 10 y 11).

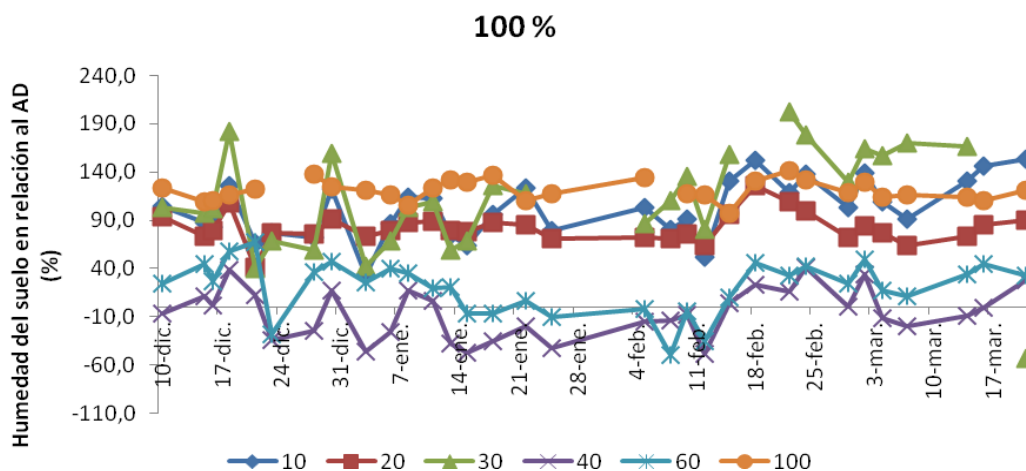


Figura 9. Evolución del contenido relativo de agua del suelo por horizonte para el tratamiento 100 % en La Estanzuela



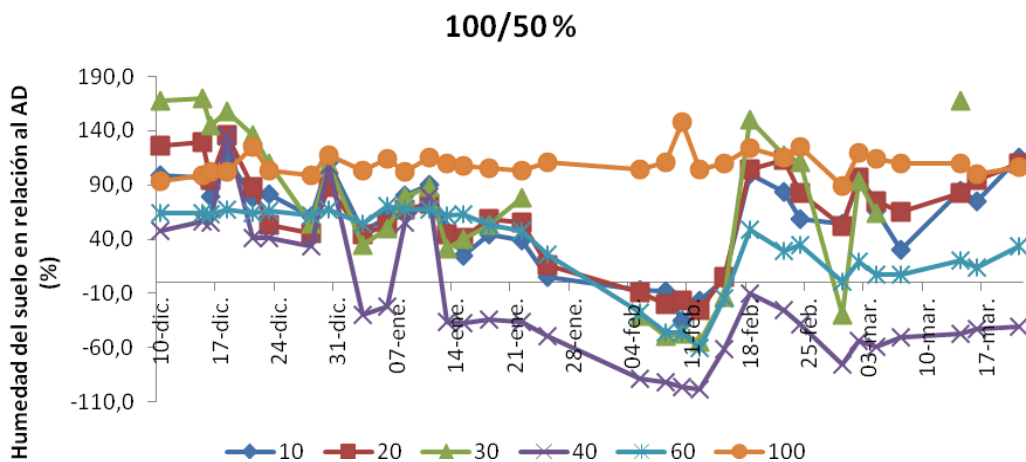


Figura 10. Evolución del contenido relativo de agua del suelo por horizonte para el tratamiento 100/50 % en La Estanzuela

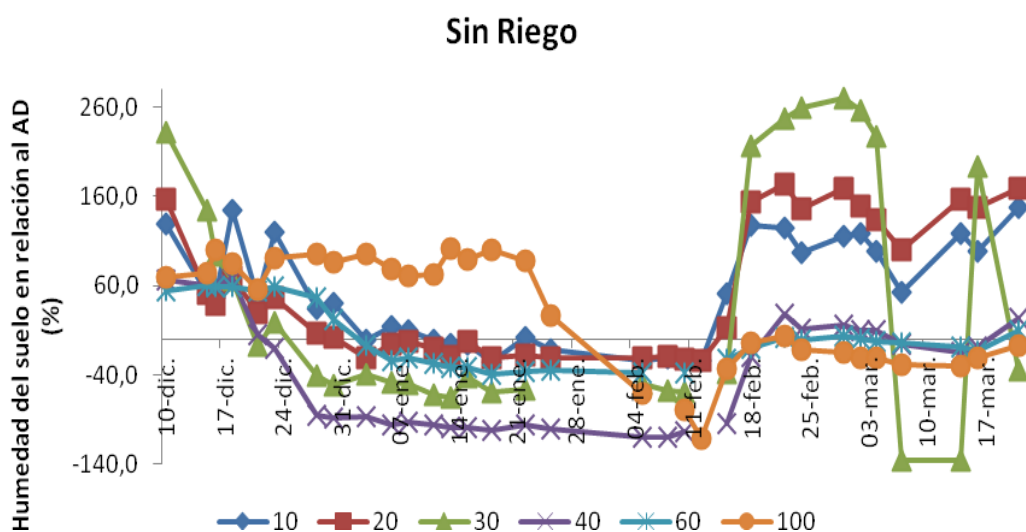


Figura 11. Evolución del contenido relativo de agua del suelo en por horizonte para el tratamiento Sin Riego en La Estanzuela

Las mediciones de humedad de suelo con la sonda FDR en todos los tratamientos y en las 6 profundidades (10, 20, 30, 40, 60 y 100 cm de profundidad) evidenciaron extracciones hasta 60 cm, con mayores extracciones concentradas hasta los 40 cm. Se puede apreciar claramente en las Figuras 9, 10 y 11.

Se evidenció extracción de agua por parte del cultivo hasta 1 m de profundidad cuando el cultivo tuvo deficiencias hídricas en etapas tempranas que estimularon una exploración radicular de mayor profundidad (Figura 11).

El desarrollo radicular alcanzó los 40 cm en  $V_8-R_1$ , 47-50 días luego de siembra y antes de la máxima cobertura; 60 cm en  $R_3$  y 1m entre  $R_4$  y  $R_5$ . Cabe recordar que en aquellos tratamientos donde se cubre toda la ET durante todo el ciclo (tratamiento 100 %) o en parte de su ciclo (tratamientos 50/100 % y 100/50 %) el nivel de humedad se mantuvo estable durante la etapa bien regada, impidiendo analizar el patrón de extracción de las raíces (Figuras 9 y 10). Asimismo en el tratamiento sin riego y en el tratamiento 100/50 % el patrón de extracción no pudo ser observado a partir de la segunda mitad de febrero debido a la ocurrencia de lluvias (Figuras 10 y 11)

Los resultados sugieren que el sensor FDR debería instalarse en la fila del cultivo para tener medidas adecuadas en términos absolutos, debido al volumen de suelo monitoreado por este método.

### **3.1.2.3. Fenología**

El seguimiento de los estados fenológicos semanalmente mostró que la fenología se vio afectada por las deficiencias hídricas. Se evidenció un adelanto en la maduración del cultivo provocado por el estrés hídrico (Figura 12). Estas diferencias se diluyeron al acercarse a  $R_8$ .

Regado			Sin Riego		
Estadio fenológico	Días acumulados	Fecha	Estadio fenológico	Días acumulados	Fecha
Siembra	0	29-oct	Siembra	0	29-oct
VE	18	16-nov	VE	18	16-nov
V2	22	20-nov	V2	22	20-nov
V4-5	40	08-dic	V4-5	40	08-dic
V6-7	47	15-dic	V6-7	47	15-dic
R1	50	18-dic	R1	50	18-dic
R2	60	28-dic	R2	60	28-dic
R3	76	13-ene	R3	76	13-ene
R4	82	19-ene	R4/5	82	19-ene
R4/5	91	28-ene	R5	91	28-ene
R5	102	08-feb	R5.5/6	102	08-feb
R5.5	109	15-feb	R6	109	15-feb
R6	130	07-mar	R6/7	130	07-mar
R6/7	140	17-mar	R7	140	17-mar
R8	159	05-abr	R8	159	05-abr
Cosecha	176	22-abr	Cosecha	176	22-abr

Figura 12. Fenología del cultivo en 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 (2013a).

#### 3.1.2.4. Cobertura del suelo, $ET_c$ , $K_c$ , precipitación e índice de bienestar hídrico

Como se explicó anteriormente y como se muestra en la Figura 13, la demanda atmosférica,  $ET_o$ , fue elevada durante el período reproductivo. La  $ET_c$  tuvo una evolución similar, como consecuencia de la  $ET_o$  y de la evolución del  $K_c$ . Teniendo picos de máximo consumo entorno a  $R_2$  y a  $R_4$ .

La evolución de la cobertura es la que determina los cambios en el  $K_c$  (Allen et al., 1998). En este trabajo la evolución del  $K_c$  se ajustó mediante la fenología y las medidas de cobertura del cultivo (Figura 13).

La cobertura para el último período no mostró una caída tan evidente como se esperaba encontrar y como lo describe Allen et al. (1998), sin embargo se constató un follaje envejecido, cada vez más evidente a partir de R<sub>5</sub>.

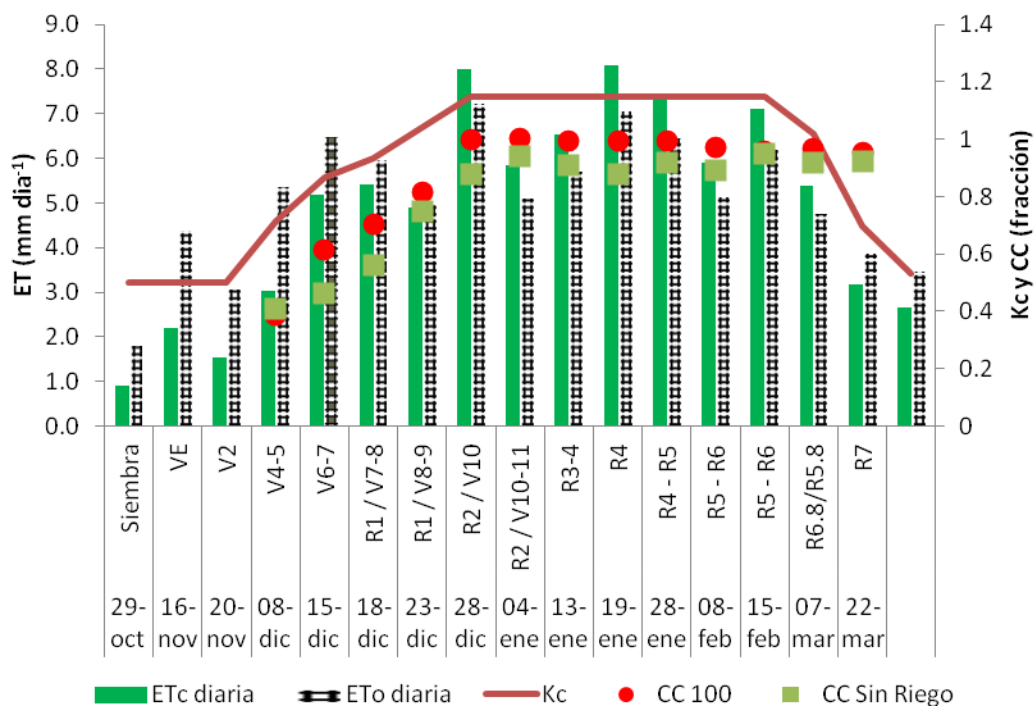


Figura 13. Evolución según el estado fenológico de los valores promedio diarios de ETo, ETc, Kc; y cobertura del suelo (CC) en los tratamientos 100 % y sin riego en la estación experimental INIA La Estanzuela

Los muestreos de cobertura y de fenología muestran que en R<sub>2</sub> se alcanza la máxima cobertura.

La duración de las fases fenológicas para estimar la evolución del K<sub>c</sub> guardó relación con las medidas de % de cobertura (CC) (Figura 13 y Cuadro 6). El número de días de duración de cada etapa del K<sub>c</sub> hasta R<sub>7</sub> se muestra en la Cuadro 6; se utilizó un K<sub>c</sub> inicial de 0.5, valor de tabla propuesto por Allen et al. (1998).

Cuadro 6. Duración en días de las fases del  $K_c$  para La Estanzuela.

$K_c$	N° días
Inicial ( $K_c = 0.5$ )	30
Desarrollo	30
Medio	67
Final	20

En la Figura 14 se aprecia la evolución de la  $ET_c$  acumulada para cada tratamiento según el balance hídrico. Se puede apreciar que la ET del cultivo se reduce como consecuencia de las deficiencias hídricas del suelo,  $ET_{c\ aj}$ . 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 estará limitada por el agua disponible (lluvias y riego).

Las mayores reducciones respecto a la  $ET_c$  sin restricciones fue del 47 % para el tratamiento Sin Riego y del 22 % para el tratamiento 50 %. Los tratamientos 100/50 %, 75 % y 50/100 % presentaron reducciones de la  $ET_c$  entre 10 y 14 % (Cuadro 6). Estas reducciones se plasmaron en el Índice de Bienestar Hídrico (Figura 39 en Anexos) en donde se observa los menores índices para los tratamientos Sin Riego y 50 %. Se evidenció 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 14, Figura 39 en Anexos).

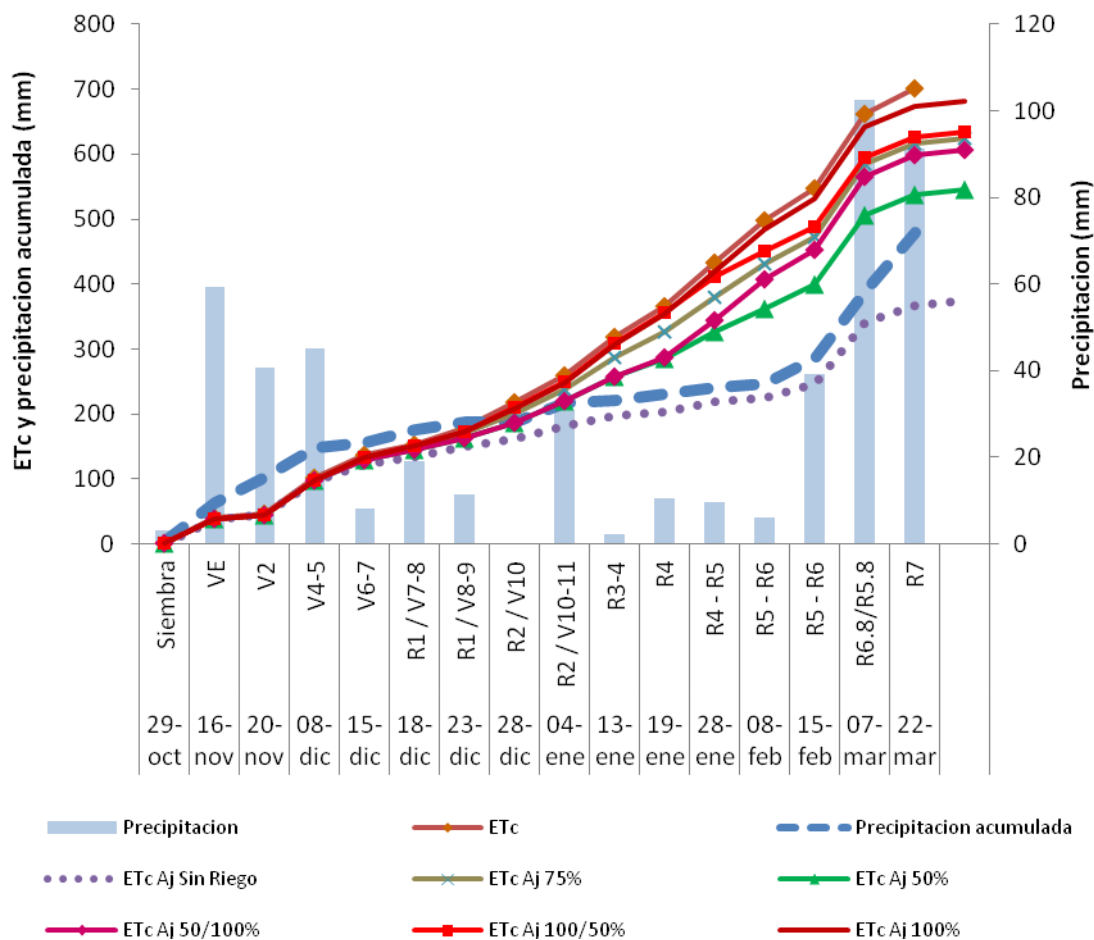


Figura 14. Evolución de la ETc, ETc aj y precipitación acumuladas durante el ciclo del cultivo y precipitación acumulada para cada etapa fenológica para la estación experimental INIA La Estanzuela

La ET<sub>c</sub> 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 Sin Riego tuvieron una ET<sub>c</sub> de 545 mm y 375 mm respectivamente (Cuadro 7 y Figura 14).

Cuadro 7.  $ET_c$  acumulada para todo el ciclo del cultivo y su reducción respecto a la  $ET_c$  sin restricciones según tratamiento para La Estanzuela

<b>Tratamiento</b>	<b><math>ET_c</math> ajustada mm</b>	<b>% Reducción de la <math>ET_c</math> sin restricciones</b>
100/50	634	10
75	624	11
50	545	22
50/100	607	14
Sin Riego	375	47
100	682	3

La diferencia entre la  $ET_c$  del tratamiento 100 % y Sin Riego fue de 307 mm. La diferencia entre la  $ET_c$  máxima y el tratamiento 50 % fue de 156 mm y respecto al 50/100 % fue de 95 mm.

#### **3.1.2.5. Altura de planta**

La altura de planta es afectada por el agregado de agua. Su evolución durante el ciclo muestra una clara diferencia entre los tratamientos regados respecto al tratamiento sin riego. El tratamiento sin riego llegó al fin de ciclo con una altura de 70 cm (Figura 15). Mientras que los tratamientos regados llegaron a 100 cm (tratamiento 50 %) y alcanzaron 105 y 110 cm el resto de los tratamientos.

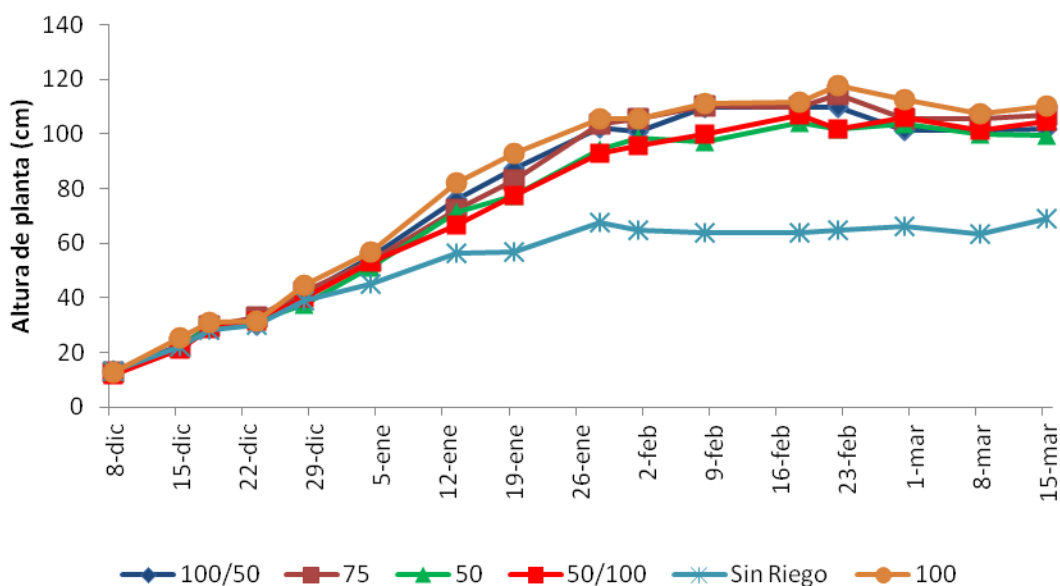


Figura 15. Evolución de la altura de planta durante el ciclo según tratamiento para La Estanzuela

La altura máxima para los tratamientos regados se alcanza entre  $R_5$  y  $R_{5,5}$ , a excepción del tratamiento sin riego el cual alcanzó antes la altura máxima, luego de  $R_4$ , antes de llegar a  $R_5$ .

### 3.1.2.6. Índice de área foliar

El Índice de área foliar (IAF) y la cobertura del cultivo se ven claramente afectada por el contenido de agua del suelo (Figura 16).

Todos los tratamientos llegaron al IAF máximo a mediados de enero cuando el cultivo estaba en  $R_3$ . El tratamiento 100 % lo mantuvo cercano a ese índice durante más tiempo que el resto de los tratamientos, en los cuales el IAF comenzó a disminuir luego de mediados de enero; excepto el 50/100 % en el cual se observó lo contrario. El tratamiento 50 % se mantuvo por debajo al resto de los tratamientos con un IAF máximo de 7,6, mientras el resto de los tratamientos regados llegaron a



máximos entre 9,5 y 10,5. El tratamiento 100/50 %, luego de  $R_4$  disminuye más que el tratamiento 75 %.

El tratamiento 50/100 % llegó a  $R_4$  con índice de 7,5. Sin embargo, el IAF presentó aumentos incluso luego de  $R_4$ , en consecuencia al aumento de agua agregado debido al cambio en la estrategia del riego de acuerdo al tratamiento. El IAF llegó a un máximo de 9,7, similar a los tratamientos regados del 100 %, 75 %, y 100/50 %. El máximo IAF se registró a principios de febrero cuando el cultivo estaba en  $R_5$ .

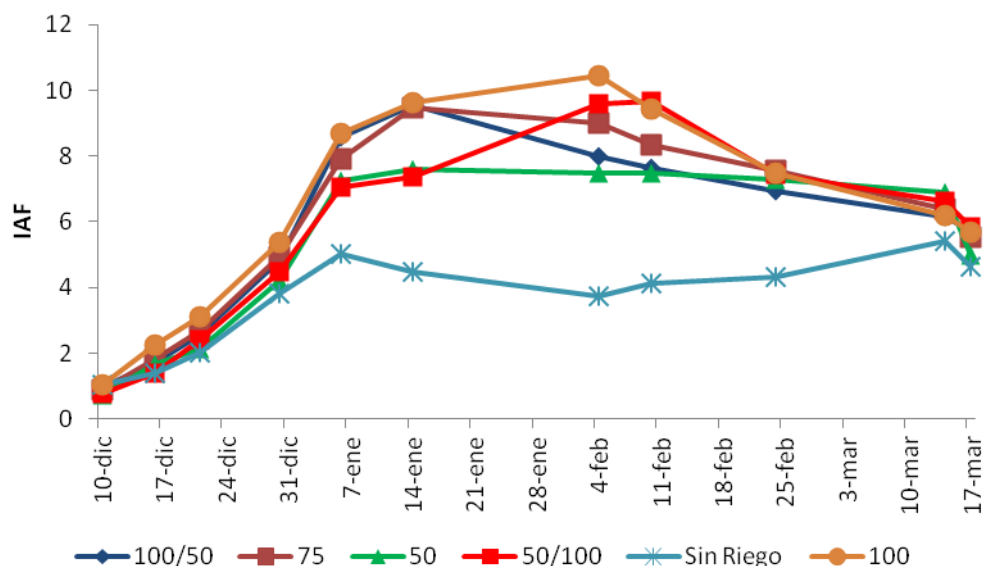


Figura 16. Evolución del índice de área foliar durante el ciclo según tratamiento para La Estanzuela.

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  $R_1$  y  $R_2$ .

La máxima cobertura del cultivo se alcanzó el 29 de diciembre cuando el cultivo estaba en  $R_2$ , momento en el que se registró un IAF cercano a 5 (4,8). Se

encontró que para el tratamiento sin riego la máxima cobertura se alcanzó también en diciembre pero unos días después que los tratamientos regados (Figura 13).

### 3.1.2.7. Conductancia estomática

La conductancia estomática se ve claramente afectada por el contenido de agua del suelo (Figura 17). Esta medida reflejó los diferentes manejos de riego.

El tratamiento sin riego y 50 % presentaron conductancias del 20% y cercanas al 60 % respecto al tratamiento del 100 %; es decir, 80 % y 40 % menores que el tratamiento 100 %.

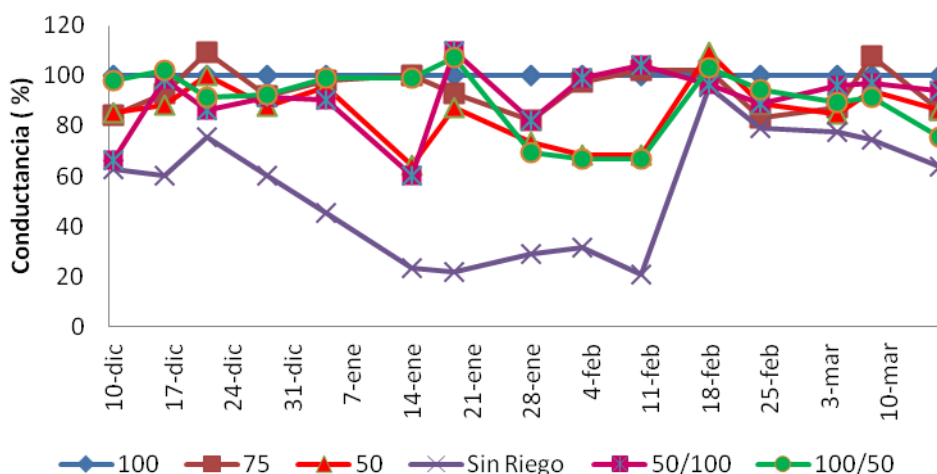


Figura 17. Evolución de la conductancia estomática del cultivo según tratamiento para La Estanzuela.

Las medidas de conductancia en términos absolutos evidenciaron una tendencia a disminuir en todos los tratamientos a partir de R<sub>5</sub> debido al envejecimiento foliar.

### 3.1.3. Rendimiento final de grano y componentes

El rendimiento en soja es afectado por el status hídrico durante su ciclo. El máximo rendimiento alcanzado fue de 5700 kg ha<sup>-1</sup> seguido de 5444 kg ha<sup>-1</sup> en los tratamientos 50/100 % y 100 % (Figura 18). Se encontraron 5200 kg ha<sup>-1</sup> y 5050 kg ha<sup>-1</sup> para los tratamientos 100/50 y 75 %. Los menores rendimientos se encontraron para los tratamientos 50 % y sin riego, con 4790 kg ha<sup>-1</sup> y 3200 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Los máximos rendimientos correspondieron a los tratamientos que tuvieron su demanda satisfecha durante todo el ciclo (100 %) o durante el PC (50/100 %). En esta zafra no hubo diferencias significativas entre satisfacer la demanda máxima solo en el período R<sub>4</sub> a R<sub>7</sub>, habiendo aportado previamente con el riego el 50% de los requerimientos; y regar bien durante todo el ciclo. El máximo rendimiento alcanzado fue de 5700 kg ha<sup>-1</sup> tratamiento 50/100 %, siendo estadísticamente igual al 100 %, 5444 kg ha<sup>-1</sup>, ( $p=0,70$ ).

Se puede interpretar por lo tanto que el estrés durante el PC repercutió en el rendimiento. La severidad en el rendimiento final dependió de la magnitud del déficit y la cantidad de tiempo transcurrido con dichos déficits.

El rendimiento aumentó con la cantidad de agua agregada, sin embargo, la función que mejor se ajustó a la respuesta fue una función plus plateau, evidenciando que existió un máximo (Figura 18). La línea continua representa un modelo lineal plus plateau: para  $x < NC$   $y = a + bx$ ; para  $x > NC$   $y = \text{plateau}$ . Esta máxima respuesta al agua se encontró en 5305 kg ha<sup>-1</sup> con 641 mm de agua total.

El análisis estadístico no mostró diferencia significativa para momento de riego, esto probablemente sea debido a que las lluvias, distorsionaron los efectos de estos tratamientos. Las lluvias aumentaron el agua neta recibida por los tratamientos y se llegó a la zona de meseta de la función rendimiento-agua total efectiva en los tratamientos de riego deficitario controlado (RDC).

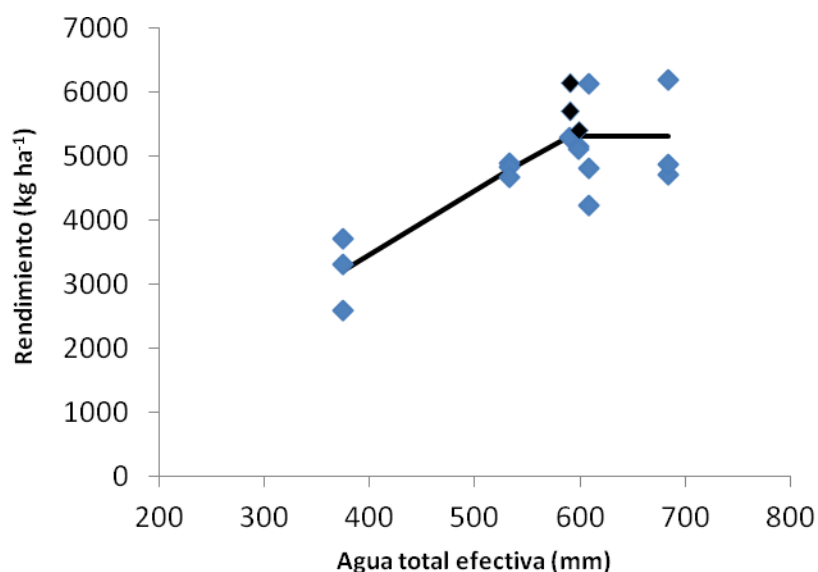


Figura 18. Rendimiento en función del agua total efectiva para La Estanzuela.

El resultado del análisis para el rendimiento de los contrastes entre los tratamientos 50/100 %, 100/50 % y 75 % en relación al 100 % mostró que ninguno de los tres tuvo diferencias en rendimiento con el 100 %. Estas relaciones probablemente están influidas por el efecto lluvia ya que a partir del 11 de febrero se registraron precipitaciones. Las lluvias revirtieron los efectos del déficit principalmente al tratamiento 75 % y tratamiento 100/50 %, los cuales no presentaron diferencias significativas para rendimiento respecto al 100 % ( $p=0,71$ ;  $p=0,94$ , respectivamente).

Los tratamientos 50/100 % y 75 % no fueron estadísticamente diferentes, aunque tuvieron diferencias en rendimientos medios de  $645 \text{ kg ha}^{-1}$  a favor de la

estrategia 50/100 %. Ambos tuvieron una cantidad de agua similar pero aplicada de forma diferente durante el ciclo del cultivo. Se evidenció una tendencia de mayor productividad para el tratamiento 50/100 %. Esto se muestra en la Figura 18 con puntos superiores a la función (puntos indicados en color negro). Por lo que la estrategia de riego deficitario controlado (RDC) 50/100 % muestra una mejor respuesta que el riego deficitario continuo (RD) de 75 %.

Los tratamientos 50/100 % y 100/50 % fueron estadísticamente iguales aunque tuvieron diferencias en rendimientos medios de  $487 \text{ kg ha}^{-1}$  a favor del 50/100 %.

Por otro lado, el tratamiento 50 % tuvo su rendimiento deprimido debido al estrés hídrico durante el PC. Esto se constata ya que hasta  $R_4$  la estrategia de riego fue igual a la del tratamiento 50/100 %, a diferencia que este último pudo revertir la situación de déficit lo suficiente como para que no se afectara su rendimiento pudiendo llegar a rendimientos máximos.

El tratamiento sin riego presentó los menores rendimientos del ensayo. Las deficiencias hídricas severas del tratamiento sin riego llevaron a reducciones del rendimiento del 44 %, entre  $650$  a  $2500 \text{ kg grano ha}^{-1}$  respecto al máximo, que no pudieron ser revertidos por la lluvia.

La humedad de grano fue similar en todos los tratamientos regados (Cuadro 8). En el tratamiento sin riego se apreció un % de humedad un poco mayor al resto, presentando algunos granos verdes. Las plantas de este tratamiento se mantenían de un color verdoso sin que se cayeran las hojas desde marzo y aún hasta cercano a la cosecha. Esto se debió a que los déficits hídricos que ocurrieron desde enero posiblemente provocaron un cambio en la relación fuente-fosa. Este déficit también pudo haber provocado una desincronización en el cuajado de los frutos y por lo

tanto al momento de cosecha existieron granos verdes con un mayor % de humedad (Cuadro 8).

Cuadro 8. Humedad de grano y grano dañado a cosecha para La Estanzuela

Tratamiento	Humedad de grano	Grano dañado
	----- % -----	-----
100/50	12,3	9
75	12,0	9
50	12,4	10
50/100	12,6	9
Sin Riego	16,2	28
100	12,0	8

Además de presentar una mayor humedad en grano, el tratamiento sin riego también presentó mayor % de grano dañado a cosecha (Cuadro 8). Esto se atribuye a que a diferencia de los tratamientos regados, este tratamiento llegó a madurez fisiológica unos días antes y por lo tanto los granos maduros transcurrieron más tiempo con condiciones adversas (lluvias) previo a cosecha.

El peso de grano para cada tratamiento no fue estadísticamente diferente. Trabajos de riego en soja (Molino, 2001 y Andriani et al., 1991), constatan que existe una tendencia a presentar mayor peso de grano en los tratamientos con mayor déficit hídrico. En este ensayo se vio una tendencia similar (mayor PMS) para el tratamiento sin riego, seguido de tratamiento 50 %, sin embargo no fue estadísticamente significativa.

Según bibliografía el número de granos por m<sup>2</sup> componente más importante en la definición del rendimiento (Egli, 1998, citado por Molino, 2001; Karam et al., 2005; Egli et al., 1983 y Snyder et al., 1982, citados por Andriani et al., 1991; Wani et al., 2012).

Se encontró menor número de nudos por planta en el tratamiento sin riego y por ende menor número de vainas por planta, respecto a los tratamientos regados, sin embargo estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. En cuanto al número de granos por vaina se mantuvo estable. Resultados similares a los reportados por Wani et al. (2012). Se encontró que la mayoría de las vainas fueron vainas de dos granos (Cuadro 16 en Anexos).

#### **3.1.4. Cantidad de agua agregada y productividad del agua**

La cantidad de agua aplicada por riego para cada tratamiento fue diferente (Cuadro 9, Figura 43 en Anexos), 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.

Los resultados de este análisis mostraron que la capitalización del agua de lluvia (lluvia efectiva) fue distinta entre tratamientos, encontrando las mayores capitalizaciones para los tratamientos más restrictivos. La cantidad de agua no aprovechada por el cultivo varió entre 250 mm y 107 mm para los tratamientos 100 % y sin riego.

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

Cuadro 9. Cantidad de agua aplicada, precipitación efectiva y agua total efectiva según tratamiento para La Estanzuela

Tratamiento	Agua aplicada	Cantidad de agua aplicada respecto a tratamiento 100 %	Precipitación efectiva mm	Agua total	Cantidad de agua total respecto a tratamiento 100 %
100/50	309	140	290	599	85
75	337	112	271	608	76
50	225	225	309	533	151
50/100	342	108	249	591	93
Sin Riego	0	449	375	375	309
100	449	0	235	684	0

La productividad del agua, considerada como los kg de grano cosechados en relación al agua total efectiva varió entre 8 kg mm<sup>-1</sup> y 9,7 kg mm<sup>-1</sup> para los tratamientos 100 % y 50/100 %, respectivamente (Cuadro 10). Existió una tendencia a menor productividad para el tratamiento que satisface la demanda durante todo el ciclo y mayor cuando la demanda hasta el PC se satisface en un 50 % y luego se riega a demanda durante el PC. Esta tendencia parecería ser mayor para el tratamiento 50/100 %, sin embargo no hubo diferencias estadísticamente significativas.

Cuadro 10. Productividad del agua total efectiva promedio en según tratamiento para La Estanzuela

Tratamiento	Productividad del agua total efectiva kg mm <sup>-1</sup>
100/50	8,7
75	8,3
50	9,0
50/100	9,7
Sin Riego	8,5
100	8,0



## **3.2. LAS BRUJAS**

### **3.2.1. Balance hídrico**

Para cada tratamiento se llevó a cabo un balance hídrico diario con el modelo y estandarizaciones indicadas en la Guía FAO N° 56 por Allen et al. (1998) y como se muestra en la sección Materiales y Métodos y de la misma forma que para el ensayo de La Estanzuela.

Mediante el balance hídrico se decidió el momento de riego y se contabilizó los mm acumulados referidos a la ET en cada tratamiento.

### **3.2.2. Determinaciones a campo**

#### **3.2.2.1. Población lograda**

La población lograda en Las Brujas 300.000 pl ha<sup>-1</sup> promedio en cada lisímetro. Se consiguió la población objetivo ya que se realizó siembra manual con dos semillas en cada lugar, con las distancias controladas mediante regla.

#### **3.2.2.2. Humedad del suelo**

La humedad del suelo se determinó mediante sonda de neutrones con medidas de 2 a 3 veces por semana previo al riego.

Se encontró que las medidas de humedad del suelo para todos los tratamientos presentaban valores bajos para el horizonte hasta 20 cm de profundidad, al igual que para las medidas en La Estanzuela. De la misma forma que en dicho sitio, este registro de humedad por no fue tenido en cuenta para el monitoreo de los tratamientos y no se incluyeron las medidas realizadas en el primer horizonte (0-20 cm). Los valores obtenidos podrían estar subvalorando el

contenido de humedad en esta profundidad, a pesar de haber realizado una calibración específica para esta profundidad, debido a imprecisiones a causa del posible escape de neutrones hacia la atmósfera (Hillel, 2004).

Como se aprecia en la Figura 48 en Anexos, El tratamiento 100 % se mantuvo durante todo el periodo con una agotamiento promedio del 41 % de 20 a 60 cm de profundidad, por lo que se evidenció un correcto manejo del riego objetivo (Cuadro 11). El resto de los tratamientos de riego se manejaron con un agregado de agua de riego en relación a este tratamiento y la evolución del contenido de agua en el suelo se muestra en las Figuras 19, 20 y 49 en Anexos.

Cuadro 11. Agotamientos promedio del agua disponible según horizonte y días transcurridos durante fase fenológica para Las Brujas

<b>Tratamiento</b>	<b>Agotamiento promedio de 20-60 cm</b>	<b>N° días</b>	<b>Fenología</b>
	------(%)-----		
100	41		Todo el período
75	68	108	V <sub>8</sub> a R <sub>7</sub>
50	77	110	V <sub>8</sub> a R <sub>7</sub>
	60	54	V <sub>8</sub> a R <sub>5</sub>
50/100	56	30	R <sub>5</sub> a R <sub>7</sub>

El tratamiento 75 % por otro lado, llegó al inicio del PC con un agotamiento cercano al 60 % de 20 a 60 cm de profundidad. Se encontró un agotamiento promedio de 68 % de 20 a 60 cm, durante 108 días, desde V<sub>8</sub> a R<sub>7</sub> (Cuadro 11). En este tratamiento las raíces se vieron obligadas a explorar todo el perfil (Figura 49 en Anexo).

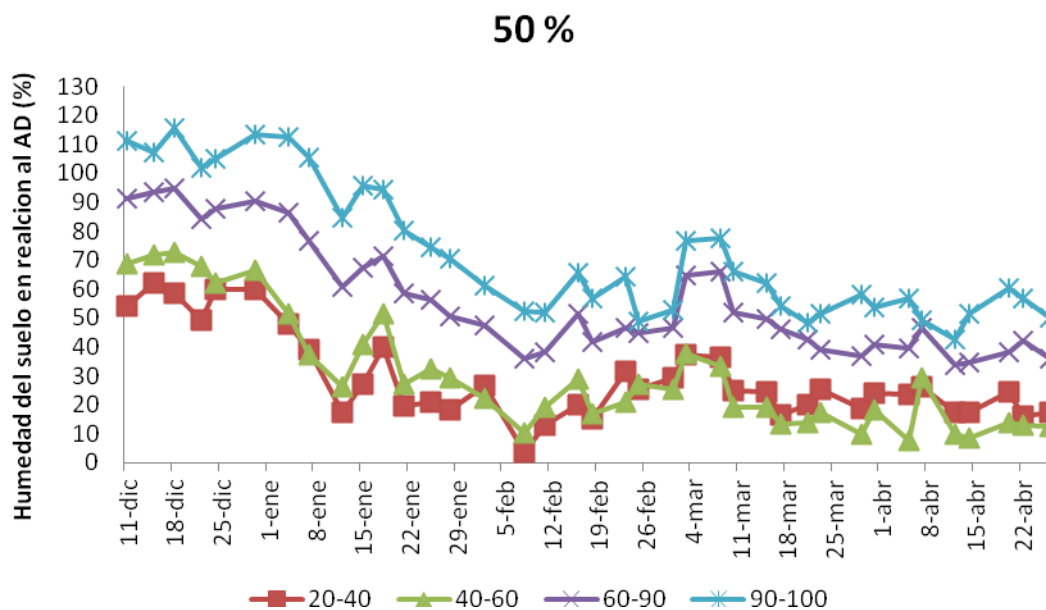


Figura 19. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 50 % en Las Brujas

El tratamiento 50 % tuvo los agotamientos más altos. Al inicio del PC llegó con un agotamiento cercano al 75 % de 20 a 60 cm (Figura 19). Este tratamiento alcanzó agotamientos máximos mayores y antes en el tiempo que el tratamiento 75 %, como era de esperarse. Presentó un agotamiento promedio de 20 a 60 cm de 77 % durante 110 días, entre  $V_8$  a  $R_7$  (Cuadro 11). En este tratamiento las raíces también se vieron obligadas a extraer agua de todo el perfil.

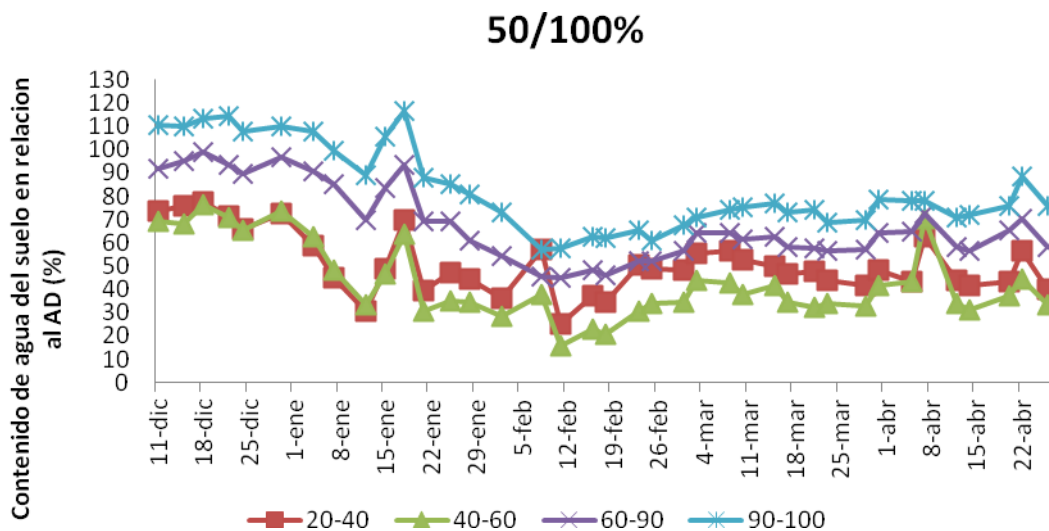


Figura 20. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 50/100 % en Las Brujas

El tratamiento 50/100 % llegó al inicio del PC con un p del 67 % en las profundidades de 20 a 60 cm. El máximo agotamiento se encontró luego de  $R_4$ , llegando a un p de 76 %. Este tratamiento se mantuvo en niveles de agotamiento del 60 % durante 56 días, desde  $V_8$  a  $R_5$  y del 56 % en promedio durante 30 días, desde  $R_5$  a  $R_7$  (Cuadro 11). En este tratamiento las raíces también exploraron todo el perfil. En la Figura 20 se muestra que cuando cambia el momento de riego pasando a 100 %, en  $R_4$ , se produjo un progresivo aumento de la humedad del suelo hasta establecerse en un nivel de agotamiento constante en cada horizonte, menor al 50 %. El tiempo que transcurrió hasta la estabilización del agotamiento, estaría evidenciando el tiempo que el cultivo tardó en recuperarse, 14 días (Figura 20).

Cabe recordar que el PC en este ensayo se dio en el mes de febrero y por lo tanto la demanda atmosférica es menor que para los meses de diciembre y enero, por lo tanto los agotamientos permisibles serán mayores que en dichos meses.

El desarrollo radicular alcanzó los 60 cm en V<sub>5</sub> 30 días después de siembra, cuando el cultivo alcanzaba 80 % de cobertura. En este ensayo se evidenció extracciones hasta 1 m de profundidad en todos los tratamientos. La exploración radicular alcanzó 1 m en R<sub>1</sub>, alrededor de 43 días luego de siembra.

### 3.2.2.3. Fenología

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 (Figura 21).

Fecha	Etapas Fenológicas	Días acum.
01-dic	Siembra	0
07-dic	VE	7
11-dic	V2	11
24-dic	V3	24
31-dic	V5	31
07-ene	V8	38
12-ene	R1	43
15-ene	R2	46
28-ene	R3	59
04-feb	R4	66
12-feb	R4/5	74
19-feb	R5	81
23-mar	R5.5	114
31-mar	R6	122
18-abr	R7	140
04-may	R8	156
23-may	Cosecha	175

Figura 21. Fenología del cultivo para Las Brujas

Al igual que en 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 (2013a).

#### **3.2.2.4. Cobertura del suelo medida, ET y $K_c$ , estimados**

Como se explicó anteriormente y como se muestra en la Figura 22, la demanda atmosférica,  $ET_o$ , fue elevada durante diciembre y enero. La  $ET_c$  estimada tuvo una evolución en donde se encontró un máximo en el período 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  $R_{4/5}$ .

Mediante la fenología y la cobertura se fue ajustando la evolución del  $K_c$  (Figura 22). La cobertura para el último período no evidenció una caída evidente como se esperaba encontrar, ocurrió lo mismo que en el cultivo de La Estanzuela.

Los muestreos de cobertura y de fenología muestran que en  $R_2$  se alcanza la máxima cobertura.

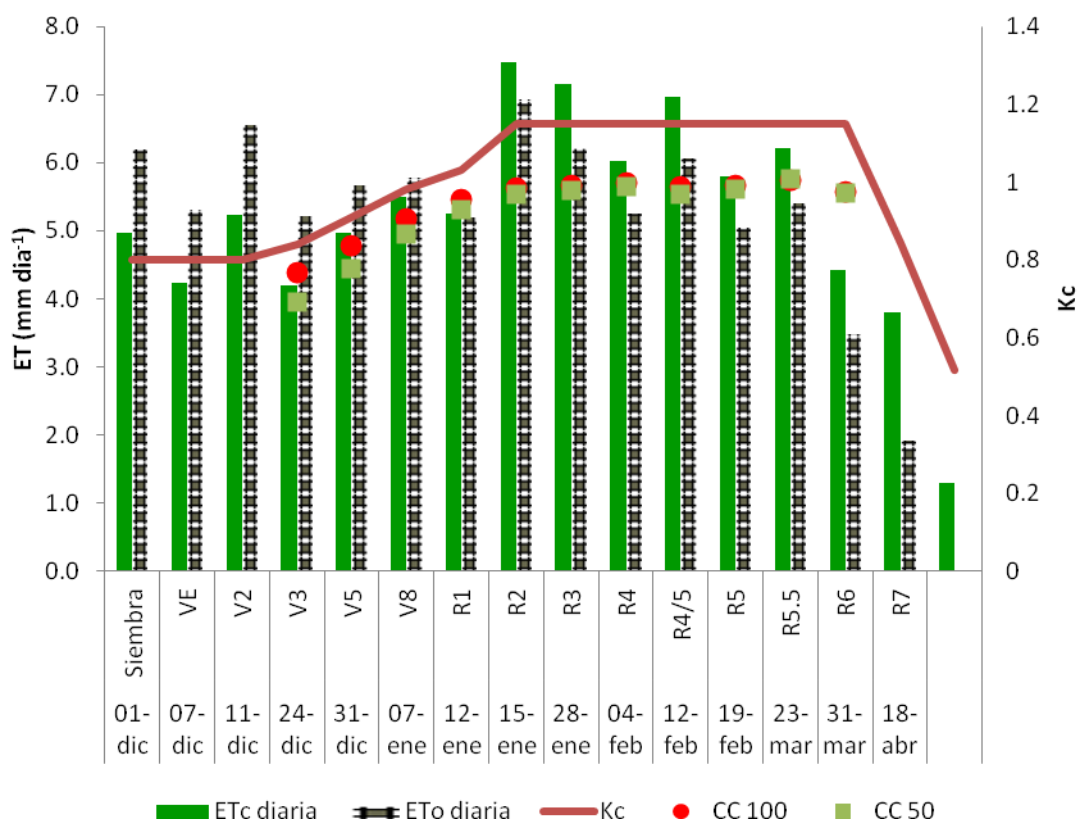


Figura 22. Evolución según el estado fenológico de los valores promedio diarios de  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $K_c$ ; y cobertura del suelo (CC) en los tratamientos 100 % y sin riego en la estación experimental INIA Las Brujas

El número de días de duración de cada etapa del  $K_c$  hasta  $R_7$  se muestra en la Cuadro 12; 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 2 días.

Cuadro 12. Duración en días de las fases del  $K_c$  para Las Brujas

$K_c$	N° días
Inicial ( $K_c= 0,8$ )	20
Desarrollo	26
Medio	60
Final	35

Se aprecia como la cantidad de días de las dos primeras fases son menores a las encontradas en La Estanzuela. Esto se debe a la fecha de siembra más tardía en Las Brujas, que tuvo como consecuencia un acortamiento de estas dos etapas.

En la Figura 23 se aprecia la evolución de la  $ET_c$  estimada para cada tratamiento según el balance hídrico. La ET del cultivo se redujo como consecuencia de las deficiencias hídricas del suelo. Las  $ET_{c\ aj}$  acumuladas durante el ciclo tuvieron reducciones de acuerdo con las cantidades de agua de riego aplicada, encontrando mayores reducciones para el tratamiento 50 % y reducciones similares para los tratamientos 75 % y 50/100 %.

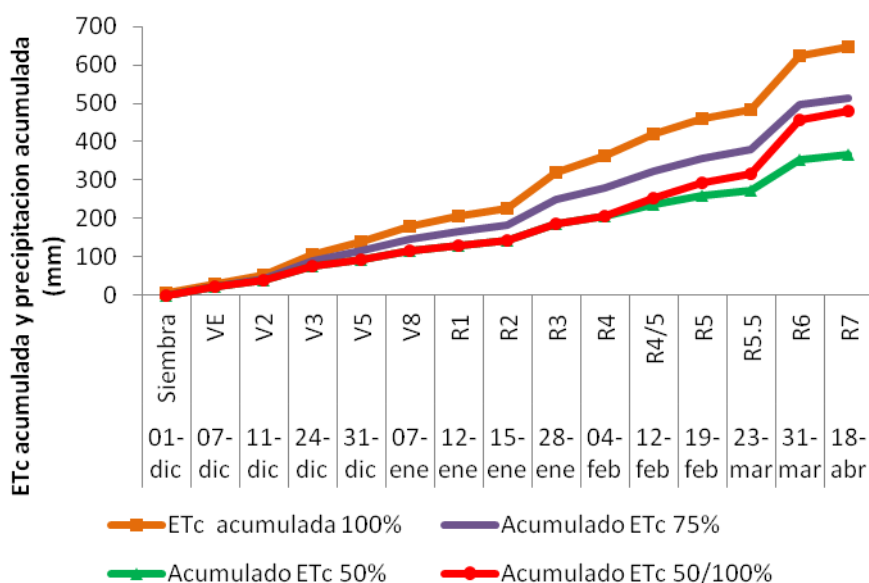


Figura 23. Evolución de la  $ET_c$  y  $ET_{c\ aj}$  estimada acumuladas durante el ciclo del cultivo para cada etapa fenológica para las Brujas

### 3.2.2.5. ET medida

El balance hídrico teórico se utilizó para llevar a cabo los tratamientos. Una vez finalizada la zafra se calculó la ET real de cada uno de ellos, determinada mediante lisimetría (Cuadro 13). Los cálculos mostraron resultados muy similares a



la ET estimada, por lo que se confirma un manejo correcto de los balances teóricos (Figura 24), con una evolución y valores de  $K_c$  estimados muy próximos a los reales. Los resultados muestran que, definiendo de forma correcta las fases del  $k_c$  y el usando los  $k_c$  de según Allen et al. (1998), la estimación del balance hídrico es exacto (coeficiente  $b=0.9927$  en la figura 24) y preciso ( $R^2=0.9318$ , figura 24) en la estimación de la  $ET_c$  del cultivo de soja.

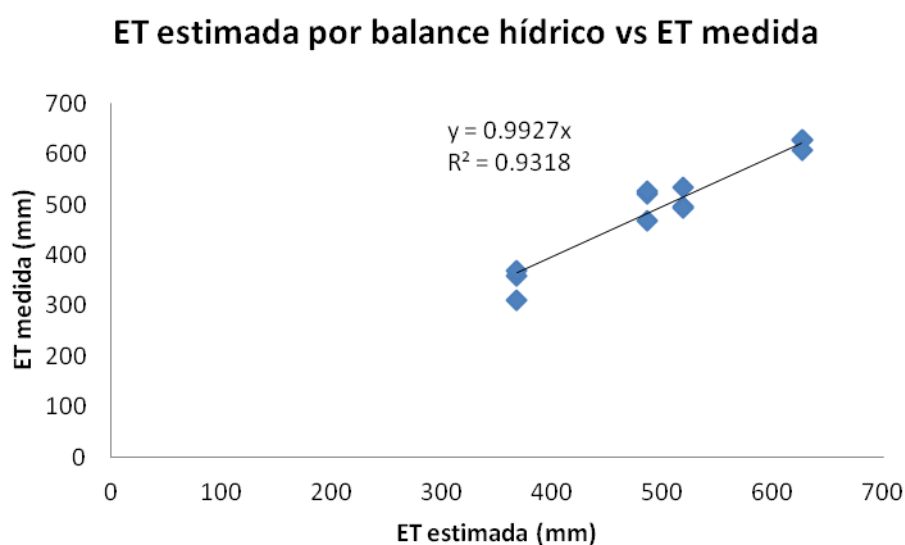


Figura 24. Relación entre ET estimada y ET medida en Las Brujas

La ET medida varió entre 347 mm y 621 mm para los tratamientos 50 % y 100 % respectivamente. Los tratamientos 75 % y 50/100 % mostraron ET similares, 508 mm y 505 mm respectivamente.

La reducción entre la ET del tratamiento más restringido (50 %) con respecto al 100 % fue de 44 %; esta reducción condujo a una disminución del rendimiento del 38 %. La reducción de la ET para los tratamientos 75 % y 50/100 % respecto al tratamiento 100 % fue similar, 18 % y 19 %, respectivamente.

Cuadro 13. Evapotranspiración acumulada total del cultivo y según períodos en Las Brujas

Tratamiento	ET estimada	ET medida	ET medida de	ET medida de		
	Total acumulada	total acumulada	siembra - periodo vegetativo	R <sub>1</sub> a R <sub>7</sub>		
	-----mm-----			%*	mm	%*
100	626	621	191	31	427	69
75	518	508	169	33	338	67
50	368	347	124	35	227	65
50/100	486	505	133	27	366	73

\*Expresado como porcentaje del total de ET<sub>c</sub> real acumulada durante todo el ciclo.

Los resultados de las ET medidas muestran que la mayor parte de la ET del cultivo se da en la etapa reproductiva, más del 65 % de la total (Cuadro 13).

En cuanto a las ET diarias, en el tratamiento bien regado, se registró un pico máximo de ET<sub>c</sub> de 8 mm día<sup>-1</sup> de valor promedio (Figura 25), entre el 29 de enero y el 11 de febrero, que coincide con el período entorno a R<sub>4</sub> (entre R<sub>3</sub> y R<sub>4,5</sub>). Dado que este es un valor promedio, y que sumado a esto, se dio en el mes de febrero, es probable existan ET<sub>c</sub> diarias mayores a 8 mm día<sup>-1</sup>. Los lisímetros de drenaje, aunque las medidas diarias son posibles, permiten calcular el balance de agua y valores de ET promedios para periodos iguales o mayores a 7 días. (Puppo et al., 2014; Aboukhaled et al., 1986).

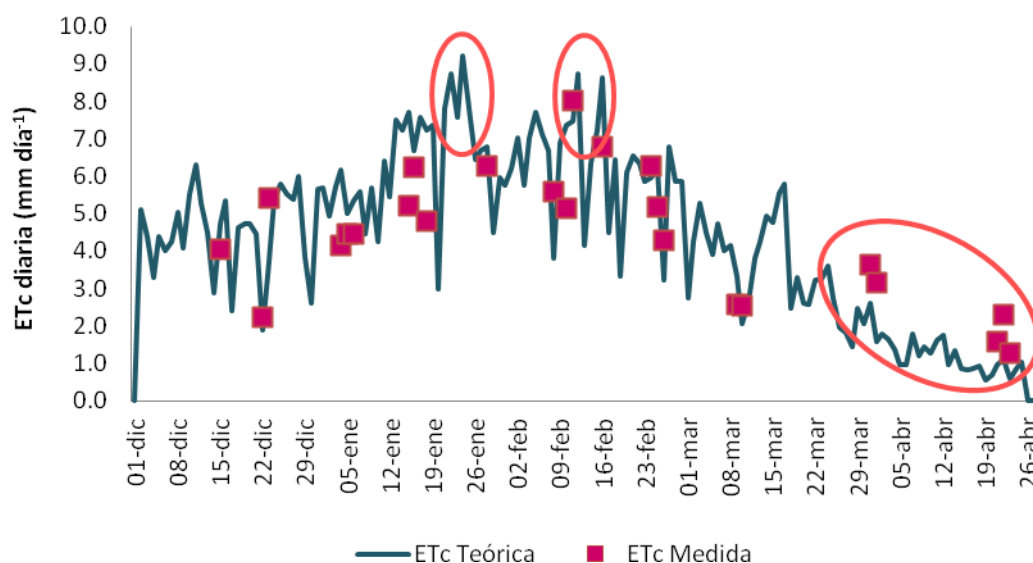


Figura 25. Evolución de la ET<sub>c</sub> Teórica y ET<sub>c</sub> diaria medida durante el ciclo del cultivo para Las Brujas

Como se ve en la Figura 25, para el período final del cultivo la ET<sub>c</sub> estimada a partir de la cual se decidían las dosis de riego fue menor al consumo real del cultivo medido en los lisímetros. La ET<sub>c</sub> medida para este periodo fue mayor, el cultivo extrajo agua retenida en todo el perfil, sin que la humedad del suelo descendiese por debajo del p establecido.

El análisis de los lisímetros del tratamiento 100 % permitió medir el K<sub>c</sub> para las distintas fases del cultivo (Figura 26). El modelo que tuvo mejor ajuste fue un cuadrático de segundo orden, con un R<sup>2</sup>=0,81.

El K<sub>c</sub> promedio de la fase inicial fue de 0,71. Este valor coincide con el K<sub>c</sub> inicial estimado según el método gráfico propuesto por Allen et al. (1998). La frecuencia de riegos fue cada dos días (día por medio) y la ET<sub>o</sub> promedio que se registró en esta fase fue de 5,5 mm día<sup>-1</sup> (ver Figura 22, promedio del periodo entre siembra hasta V<sub>2</sub>). Por lo tanto, el valor de K<sub>c</sub> inicial según el método propuesto por Allen et al. (1998) es de 0,73. Este valor es muy similar al K<sub>c</sub> medido en este trabajo.

El  $K_c$  máximo ( $K_c$  de la fase media) estuvo entre 1,1 y 1,05. Esos valores correspondieron al periodo entre 6 de enero al 16 de febrero (41 días), cuando el cultivo estaba entre  $V_8$  y  $R_4$ , por lo tanto, en torno a floración. El valor propuesto por Allen et al. (1998) para esta etapa es de 1,15, ligeramente superior a los medidos en este trabajo.

El  $K_c$  de la fase final llegó a valores de 0,6 para el periodo del 2 al 23 de abril, correspondiente a la fase fenológica posterior a  $R_6$ , llegando a  $R_7$ .

El  $K_c$  final, correspondiente a  $R_8$  es 0,5 según Allen et al (1998). En este trabajo no se determinó el valor de  $K_c$  de esta fase ya que los riegos se suspendieron a partir de  $R_7$ , así como las medidas de humedad en el suelo.

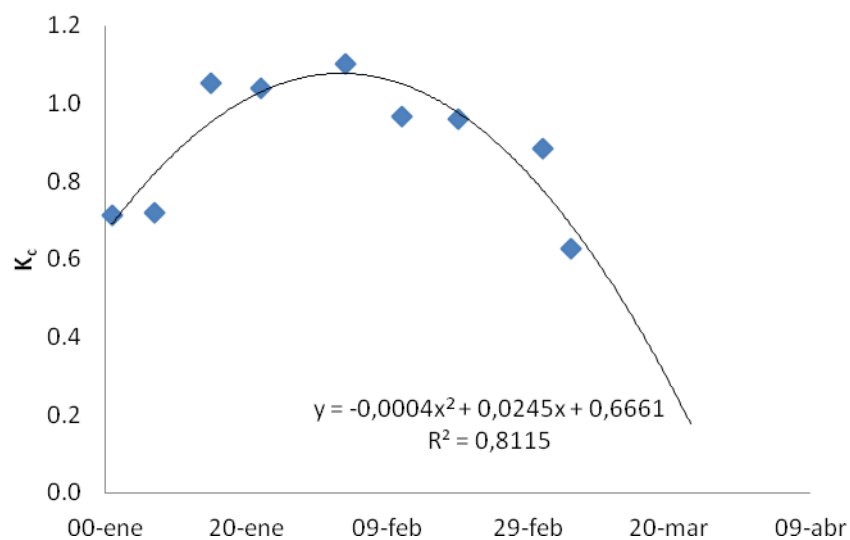


Figura 26. Evolución del  $K_c$  medido durante el ciclo del cultivo para Las Brujas

Al compararlo con los  $K_c$  para soja en Uruguay encontrados por Grasso (2015), ajustados con el modelo Winlsareg, el cual fue calibrado mediante medidas de humedad en el suelo, se encontraron similitudes. Grasso (2015) encontró valores de

$K_c$  de 0,35 para la fase inicial, de 1,18 para la fase de desarrollo y 0,75 para la fase final.

Resulta importante destacar la importancia en la determinación y ajuste del  $K_c$  del cultivo. Las mejoras en los coeficientes conducen a una mejor estimación de la  $ET_c$  y manejo del riego, aumentando la eficiencia del uso del agua, permitiendo ahorros de agua de riego (Bryla et al., 2010).

#### **3.2.2.6. Altura de planta**

La altura de planta fue afectada por el riego con una respuesta diferencial entre las distintas cantidades de agua aplicada. Su evolución durante el ciclo mostró una clara diferencia entre los tratamientos (Figura 27). El tratamiento 100 % alcanzó la mayor altura, llegando a 1,28 m en promedio. Este tratamiento tuvo problemas de vuelco en uno de los 3 lisímetros y dicho problema se agravó a medida que se acercaba el momento de cosecha debido al aumento del peso de los granos. Los tratamientos 50 % y 75 % se comportaron de manera similar llegando ambos a 1 m de altura. El 25 de febrero se alcanzó la altura máxima, cuando el cultivo estaba en  $R_5$ . En la Estanzuela la altura máxima se alcanzó en esta misma fase. El tratamiento 50/100 % en cambio, luego de  $R_4$ , cuando la estrategia de riego cambia para satisfacer la demanda al 100 %, muestra aumentos en altura. Llegando al máximo luego del 13 de marzo cuando el cultivo estaba en  $R_{5.5}$ . Este tratamiento llega a una altura intermedia de 1,16 m.

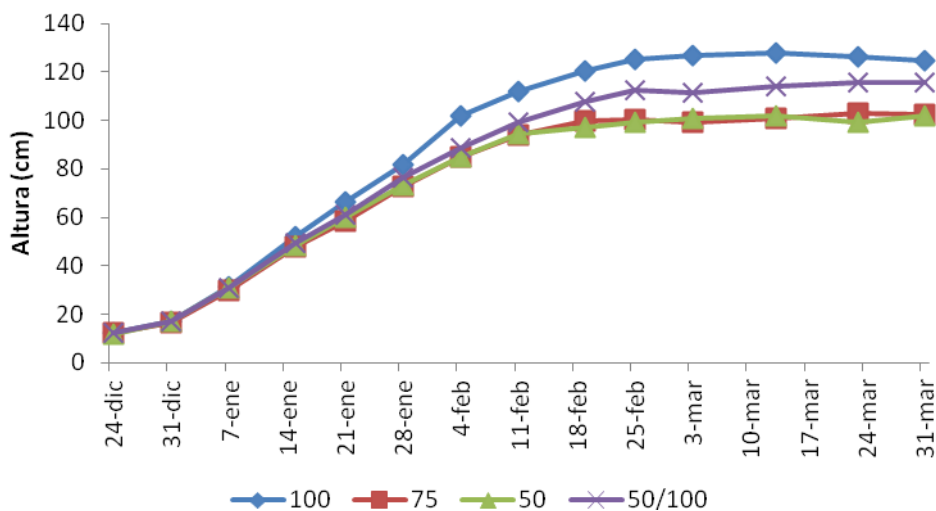


Figura 27. Evolución de la altura de planta durante el ciclo para Las Brujas

### 3.2.2.7. Cobertura del suelo por el cultivo

El 100 % de cobertura del cultivo se alcanzó el 14 de enero cuando el cultivo estaba en plena floración,  $R_2$ . En esta misma etapa se midió el  $K_c$  máximo. Coincidiendo con la metodología para la evolución del  $K_c$  descrita por Allen et al. (1998), que indica que el  $K_c$  máximo ocurre en la máxima cobertura del suelo y entorno a floración. Se encontró que para el tratamiento 100 % presentó coberturas mayores que el resto de los tratamientos, el 100 % se alcanzó un poco antes que en los otros tratamientos (Figura 22), en los que la máxima cobertura se alcanzó hacia fines de enero cuando el cultivo estaba en  $R_3$ .

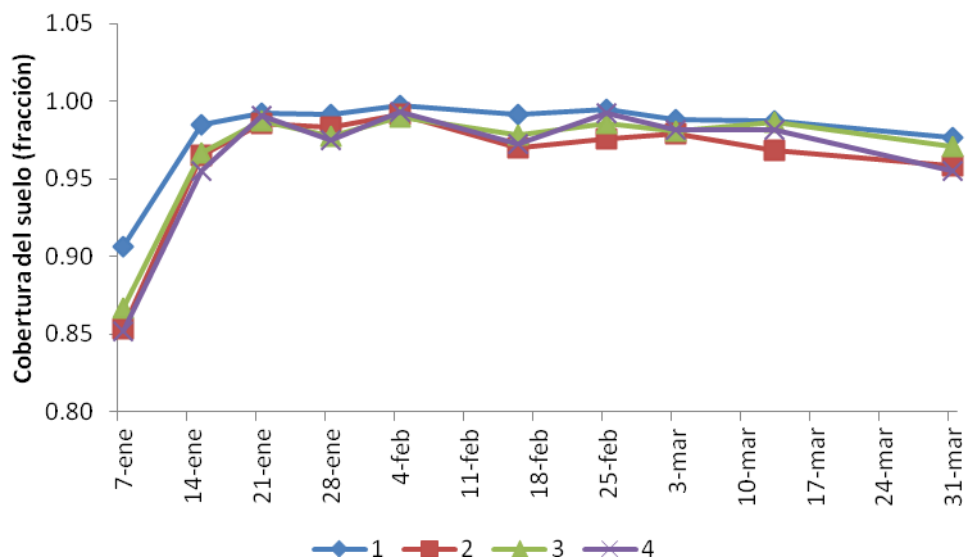


Figura 28. Evolución de la cobertura del suelo durante el ciclo según tratamiento

La cobertura comenzó a disminuir sutilmente a fines de marzo, cuando el cultivo estaba en  $R_6$ , sin embargo, como ya se mencionó, se esperaba que esta disminución fuera más evidente (Figura 28). Si bien no disminuyó el follaje, el mismo estaba envejecido, al igual que en La Estanzuela.

### 3.2.2.8. Conductancia estomática

La conductancia estomática se ve claramente afectada por el contenido de agua del suelo (Figura 29). Se evidenció el manejo de los riegos con las medidas de la conductancia estomática previa al riego.

El tratamiento 75 % y 50 % presentaron conductancias con reducciones de hasta el 60% respecto al tratamiento del 100 %.

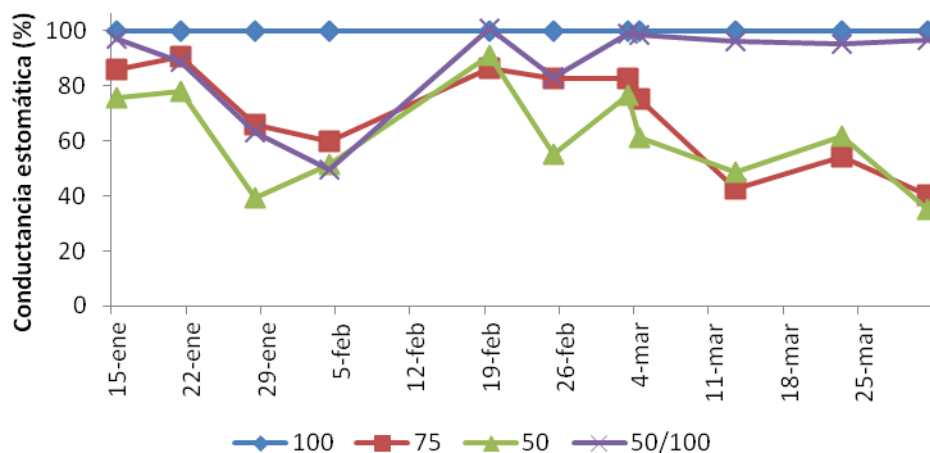


Figura 29. Evolución de la conductancia estomática del cultivo según tratamiento

### 3.2.2.9. Cantidad de agua agregada

La cantidad de agua aplicada por riego para cada tratamiento fue diferente (Figura 30), variando entre 630 mm para el 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 distribuida de forma diferente en el ciclo.

Como se ve en la Figura 30, existió un aporte de agua mínimo por precipitación ya que existieron eventos de lluvia en la fase inicial del cultivo en los cuales el Rain out Shelter no se cerró. La decisión de este manejo se debió a que en una siembra previa de soja, eventos de Rain out Shelter cerrado en la fase inicial del cultivo alteraron el desarrollo normal de la plántula.



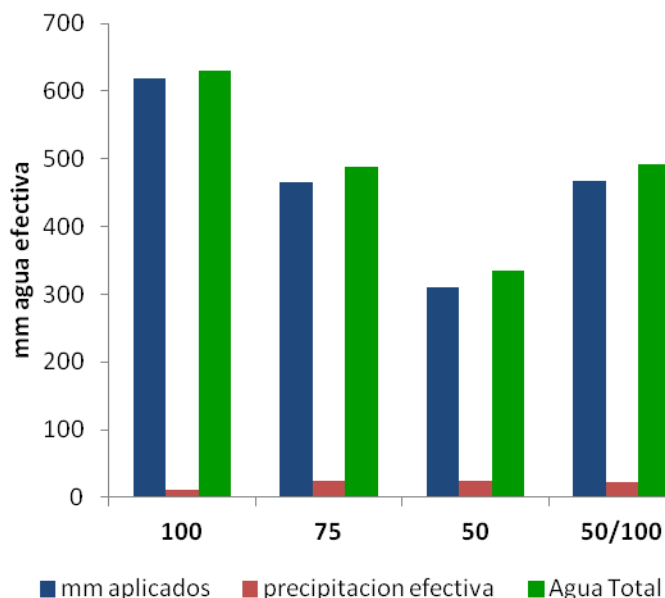


Figura 30. Cantidad de agua aplicada, precipitación efectiva y agua total según tratamiento

### 3.2.2.10. Rendimiento final de grano y componentes

El rendimiento en soja es afectado por la cantidad de agua agregada durante su ciclo ( $p= 0.0017$ ). El máximo rendimiento alcanzado fue de  $4500 \text{ kg ha}^{-1}$  seguido de  $3800 \text{ kg ha}^{-1}$  en los tratamientos 100 % y 50/100 %. Se encontraron  $3300 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $2800 \text{ kg ha}^{-1}$  para los tratamientos 75 % y 50 %. El menor rendimiento se encontró lógicamente para el tratamiento con mayor restricción de agua de riego (Figura 31).

Los rendimientos en este sitio son en general un poco 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 y de  $\text{CO}_2$ , 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 fuera menor.

El análisis estadístico muestra que a mayor agregado de agua mayor rendimiento, sin embargo el efecto momento no fue estadísticamente significativo.

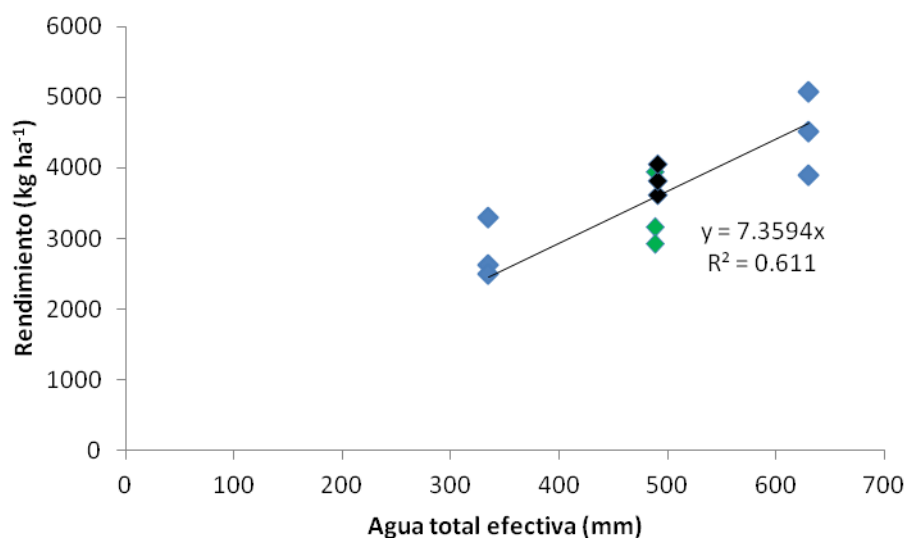


Figura 31. Rendimiento en función del agua total efectiva para Las Brujas. Los puntos en celeste corresponden a los tratamientos 50 % y 100 %, los puntos en verde corresponden al tratamiento 75 % y los negros al tratamiento 50/100 %.

El rendimiento en función del agua total efectiva en el cultivo se presentó como una relación lineal. Se obtuvo un rendimiento máximo de 4500 kg ha<sup>-1</sup> con 630 mm de agua total (Figura 31). Las deficiencias hídricas, severas en el tratamiento 50 %, llevaron a reducciones del rendimiento del 38 % respecto al máximo. En este experimento no se alcanzó un plateau o cambio de pendiente en la función debido a que no hubo un tratamiento de riego que contemplase un exceso de agua.

Al analizar los contrastes para los tratamientos 50/100 % y 75 % respecto a 100 %, se encontró que el tratamiento 75 % rindió menos que el 100 %. Por otro lado, no hubo diferencias en rendimiento para los tratamientos 50/100 % y 100 %,

( $p= 0,11$ ) pese a la mayor cantidad de agua total efectiva del tratamiento 100 %, pero hubo un detrimento de  $673 \text{ kg ha}^{-1}$  en el tratamiento 50/100 %.

Los tratamientos 75 % y 50/100 % no fueron diferentes entre sí estadísticamente pero tuvieron una diferencia de  $483 \text{ kg ha}^{-1}$ , a favor del tratamiento 50/100 %.

Al igual que en La Estanzuela se encontró que el tratamiento 50/100 % tiene una tendencia a tener una productividad del agua mayor, sin embargo no fueron estadísticamente diferentes. Si bien el tratamiento 50/100 % y 75 % tienen la misma cantidad de agua aplicada, los puntos correspondientes al primero que dan por encima de la recta de productividad y los del segundo quedan por debajo (puntos indicados en color negro para el tratamiento 50/100 % y en verde para el 75 % en la Figura 31). Por lo que la estrategia de RDC 50/100 % muestra una a tendencia a una mayor productividad del agua que el RD de 75 %.

El tratamiento 50/100 % evidenció que satisfacer la demanda máxima en el período  $R_4$  a  $R_7$  tiene un efecto muy positivo en el rendimiento final a pesar de las deficiencias en etapas previas. Déficits en el PC tienen detrimentos en el rendimiento que impiden concretar los rendimientos máximos.

La productividad del agua total efectiva se encontró entre  $7,2$  y  $9,1 \text{ kg mm}^{-1}$  para los tratamientos en el siguiente orden: 100 %, 75 % y 50 %. Zwart y Bastiaansen, según Fereres y Soriano (2007), encontraron productividades mayores para tratamientos que no satisfacen el 100 % de la demanda. El tratamiento 50/100 % presentó valores intermedios de  $8,2 \text{ kg mm}^{-1}$ .

Cuadro. 14. Productividad del agua total efectiva promedio, peso de mil semillas y granos por m<sup>2</sup> según tratamiento para Las Brujas

Tratamiento	Productividad del agua total efectiva kg mm <sup>-1</sup>	Peso de mil semillas g	Nº granos m <sup>-2</sup>
100	7,3	200	2318
75	7,2	205	1375
50	9,1	191	1496
50/100	8,2	202	2374

El peso de mil semillas (PMS) para los tratamientos no tuvo grandes diferencias (Cuadro 14), coincidiendo con los resultados encontrados por De Souza et al. (1997) y se mantuvo cercano a 200 g, existió una mínima tendencia a menor peso en el tratamiento 50 %.

No hubo grano dañado a cosecha para ningún tratamiento y la humedad de grano fue similar en todos los tratamientos.

El número de granos por m<sup>2</sup> según bibliografía es el componente más importante en la definición del rendimiento (Egli, 1998, citado por Molino, 2001; Karam et al., 2005; Egli et al., 1983 y Snyder et al., 1982, citados por Andriani et al., 1991; Wani et al., 2012), sin embargo las diferencias no fueron estadísticamente significativas en este ensayo. De todas formas, el rendimiento final se comporto de manera similar al resultado del n° de granos totales en cada tratamiento. Se encontró mayor cantidad de granos para el tratamiento 100 %, seguido del 50/100 % (Cuadro 14). Los tratamientos 50 % y 75 % se mantuvieron con menores cantidades, cercanas a 1400 granos m<sup>-2</sup>.

En este sitio no se encontraron grandes diferencias en el número de nudos por planta pero hubo una tendencia en el número de vainas por planta. Los tratamientos 50 % y 75 % presentaron las menores cantidades de vainas por planta. En cuanto al número de granos por vaina se encontró que la mayoría de las vainas

son vainas de uno y dos granos (Cuadro 17 en Anexos), coincidiendo con los resultados de (Wani et al., 2012).

### 3.3. ANÁLISIS ENTRE SITIOS

Al analizar el rendimiento en función del agua efectiva total para ambos sitios en conjunto, se pudo ajustar una función lineal plateau con un  $R^2$  de 0,68 (Figura 32). La línea continua de la Figura 32 representa un modelo lineal plus plateau: para  $x < NC$   $y = a + bx$ ; para  $x > NC$   $y = \text{plateau}$ .

Los resultados indicaron que existió una respuesta lineal al agregado de agua hasta los 590 mm, con un rendimiento máximo de  $5000 \text{ kg ha}^{-1}$ , a partir de este punto no hay aumentos en rendimientos con mayores agregados de agua, la función llegó a un plateau al igual que lo reportado por Specht et al. (1986).

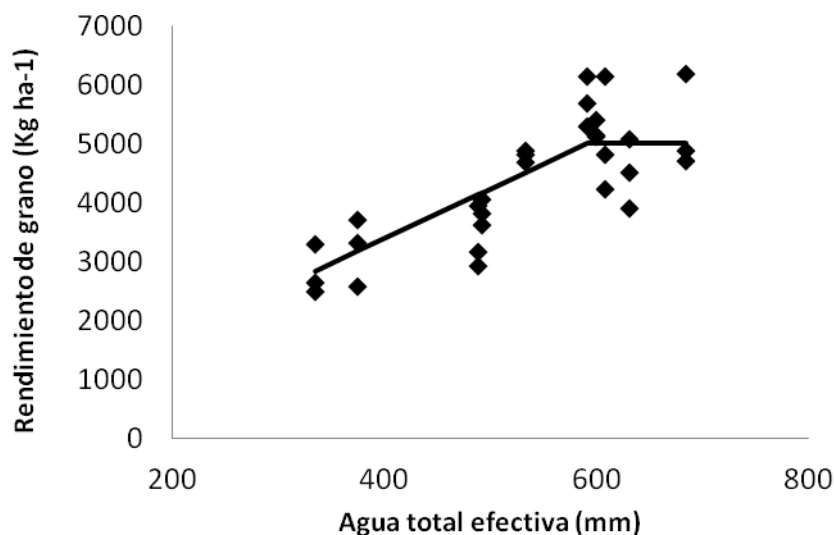


Figura 32. Rendimiento en función del agua total efectiva para los dos sitios evaluados

Se encontró una productividad del agua, en el rango evaluado, de  $8,5 \text{ kg mm}^{-1}$ , similar a 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 si en cantidad de agua. Los resultados estadísticos mostraron que los tratamientos 100/50 %, 50/100 % y 75 % tuvieron cantidades de agua menores que el 100 % e iguales entre sí.

Cuando se analizaron los tratamientos 100 % y 75 % existió diferencia significativa entre ambos con un 0,058 de probabilidad. El tratamiento 75 % en relación al 100 % tuvo una diferencia de rendimiento de  $675 \text{ kg ha}^{-1}$ . Las diferencias se debieron a lo que ocurrió en Las Brujas, donde no hubo influencia del agua de lluvia y el agua aplicada fue igual a la programada con los riegos. Sin embargo en La Estanzuela, si bien las cantidades de agua fueron distintas entre el tratamiento 75 % y 100 %, fueron mayores a las programadas con los riegos por los eventos de lluvia, y éstas impidieron los agotamientos esperados en el PC, enmascarando las diferencias entre estos dos tratamientos. A pesar de esto, existió diferencia significativa respecto a la cantidad de agua respecto al 100 %.

El rendimiento entre los tratamientos 50/100 % y 75 % fueron estadísticamente iguales, con una diferencia de  $564 \text{ kg ha}^{-1}$  a favor del 50/100 %.

Por otro lado, si analizamos como se comportaron los tratamientos 50/100 % en cada sitio vemos que en Las Brujas, si bien no hubo diferencia significativa en rendimiento entre tratamiento 100 % y 50/100 % hay una diferencia de  $673 \text{ kg ha}^{-1}$ . Sin embargo en La Estanzuela los rendimientos con el tratamiento 50/100 % y 100 % fueron casi iguales ( $260 \text{ kg ha}^{-1}$  de diferencia, a favor del 50/100 %).

Como se observa en la Figura 33 y Cuadro 15, las reducciones en la ET entre los tratamientos 50/100 % y 100 % fueron diferentes. Se encontró una mayor disminución en Las Brujas, provocada por un agotamiento del AD mayor, que redujo la ET ( $ET_{c\text{aj}}$ ) un 42 % respecto a la máxima ( $ET_c$ ). Los datos de ET medida muestran una disminución del 30 % respecto a la máxima. En cambio, esta reducción fue menor en La Estanzuela, (21,8 %) debido a que los eventos de lluvia evitaron un agotamiento de agua tan alto como el de Las Brujas.

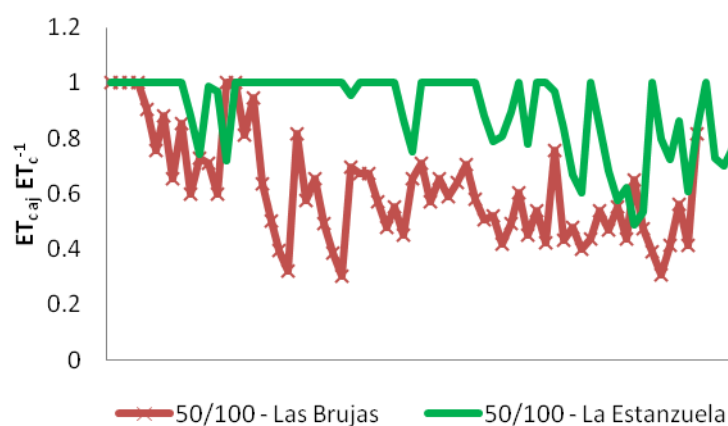


Figura 33. Índice de bienestar hídrico del tratamiento 50/100 % desde siembra hasta  $R_4$  para los dos sitios

Cuadro 15. Reducción de la  $ET_c$  desde siembra a  $R_4$  para ambos sitios

Sitio	Agua efectiva desde siembra hasta $R_4$ :	$ET_{c\text{aj}}$	$ET_c$	Disminución de la $ET_c$ %
	-----mm-----			
Las Brujas	177,7	212,3	365,8	42,0
La Estanzuela	261,8	279,9	357,7	21,8

Las medidas de sonda constataron estas reducciones. En Las Brujas el agotamiento del AD al inicio del PC fue de 76 % en ambas profundidades. En cambio para La Estanzuela fue de 55 % de 20-40 cm y de 39 % para los 20-60 cm.

Si bien no hubieron diferencias significativas entre el tratamiento 50/100 % respecto al bien regado para ambos sitios, se registró una diferencia de  $673 \text{ kg ha}^{-1}$  en Las Brujas, donde no hubo influencia de la lluvia. Cabe destacar que en nuestras condiciones (Sur del Uruguay) existe un 80 % probabilidad de que lluevan más de 240 mm desde noviembre a enero, desde siembra hasta  $R_4$ . 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  $R_4$  y obtener ahorros de agua sin detrimentos en el rendimiento final.

Se calculó el  $K_y$  para estudiar la influencia en el rendimiento de la disminución de la ET. Para ello se utilizaron los datos promedios para los tratamientos de los RD continuos, 100 %, 75 %, 50 % y sin riego en ambos sitios. Los resultados permitieron demostrar una reducción del rendimiento promedio por tratamiento directamente proporcional a la reducción en ET. La pendiente de la recta ajustada que pasa por el origen fue de 1,02 (Figura 49).

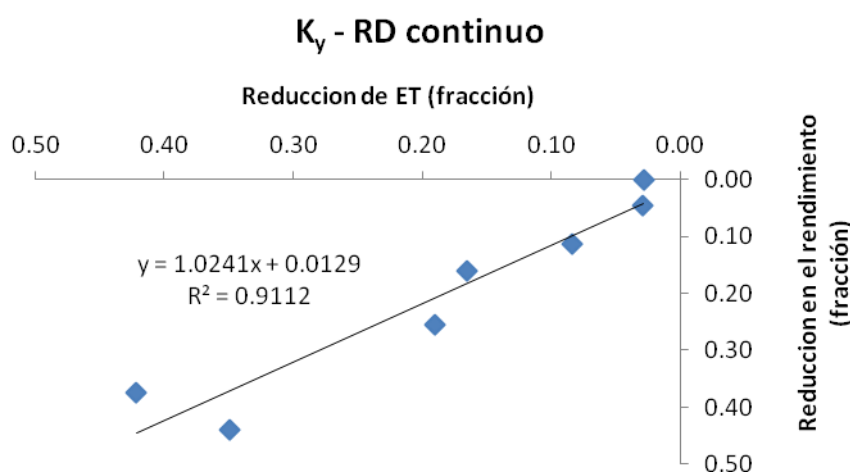


Figura 34.  $K_y$  promedio para el ciclo total del cultivo de soja basado en los RD de ambos sitios



Se puede decir con un 95 % de confianza que el  $K_y$  promedio estuvo entre 0,82 y 1,27 con intercepto 0. El intercepto no fue diferente a 0 con un 80 % de probabilidad, por lo cual se podría indicar una proporcionalidad directa entre estas variables en el rango de medición. Doorenbos y Kassam (1980), reportaron un  $K_y$  de 0,85 para el ciclo total del cultivo de soja, según Smith y Steduto (2012) esta relación puede cambiar entre países y localidades.

#### 4. CONCLUSIONES

- 1- La máxima  $ET_c$  medida (importante para definición de caudal de diseño de un equipo) fue de  $8 \text{ mm dia}^{-1}$  en el sur del Uruguay. Este valor correspondió a un promedio de 13 días, por lo que no se descartan ET mayores.
- 2- La máxima  $ET_c$  diaria medida se registró durante el período entre  $R_4$  a  $R_7$ , período crítico para el cultivo.
- 3- La ET medida acumulada para una variedad de soja de ciclo medio, al sur del Uruguay, varió entre 621 mm sin restricciones hídricas y 347 mm para condiciones restrictivas.
- 4- El balance hídrico estimado con los valores de  $K_c$  de FAO N° 56, descriptos por Allen et al. (1998), y la duración de fases ajustadas con las medidas de porcentaje de cobertura, resultó en una herramienta confiable para el manejo del riego.
- 5- Los valores de  $K_c$  medidos para una soja de ciclo medio, fueron 0,71 para la fase inicial, entre 1,1 y 1,05 para la fase media y 0,6 para fase fenológica posterior a  $R_6$ , llegando a  $R_7$ .
- 6- El  $K_c$  máximo se registró cuando el cultivo estaba  $R_2$  y con un 100 % de cobertura del suelo.
- 7- La curva de rendimiento en función del agua total efectiva respondió a una función lineal plateau. La misma presentó un máximo de  $5000 \text{ kg ha}^{-1}$  para 590 mm de agua total efectiva en el sur del Uruguay.

- 8- La productividad del agua para el cultivo fue de  $8,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ .
- 9- La misma cantidad de agua aplicada en momentos diferentes tuvo consecuencias en el rendimiento final. Riegos deficitarios con el 50 % de la ET desde siembra hasta  $R_4$  no repercutieron en el rendimiento si en el período crítico se riega con el 100 % de la demanda del cultivo. 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.
- 10- Los tratamientos con déficit hídrico durante el período  $R_4 - R_7$  produjeron una importante reducción en el rendimiento.
- 11- El 80 % de cobertura del cultivo para el tratamiento 100 % se alcanzó con un IAF de 3, cuando el cultivo estaba en floración, entre  $R_1$  y  $R_2$ . La máxima cobertura del cultivo se alcanzó cuando el cultivo estaba en  $R_2$ , con un IAF cercano a 5 (4,8).
- 12- La reducción de rendimiento es directamente proporcional a la reducción en la evapotranspiración.
- 13- En etapas tempranas el riego acelera la cobertura del suelo.
- 14- La altura de planta responde al agregado de agua pero no está directamente relacionado al rendimiento final.
- 15- La conductancia estomática es una medida sensible al contenido de agua en el suelo.

16-De acuerdo a la evolución de humedad del suelo en los distintos horizontes se evidenció una extracción mayor en la profundidad de 20 a 40 cm sin embargo el cultivo fue capaz de extraer agua hasta al menos 1 m de profundidad.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Aboukhaled A, Alfaro J, Smith M. 1986. Los Lisímetros. Roma, FAO. (Estudio, Riego y Drenaje N° 39). 60 p.

Agorio C, Cardellino G, Corsi W, Franco J. 1988. Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay : I. Magnitud y Frecuencia de la Lámina Neta Total. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca), DGRNR (Dirección General de Recursos Naturales Renovables), DUMA (División Uso y Manejo del Agua). Montevideo, Uruguay. 110 p.

Allen R, Pereira L, Howell T, Jensen M. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurements accuracy. *Agricultural Water Management*, 98: 899 - 920.

Allen R, Pereira L, Raes D, 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. 298 p.

Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO. Irrigation and Drainage Paper N° 56. 300 p.

Altamiro A, Da Silva H, Durán A, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. Montevideo (Uruguay): MAP/DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes). 96 p.

- Andersen J, Alagarswamy G, Rotz C, Ritchie J, 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. Soja: actualización técnica. (INTA) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Marcos Juárez, Marcos Juárez, Argentina: INTA. Vol. 3. 50 p.
- Andriani J, Andrade F, Suero E, 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, Terra R. 2010. El riego en un clima cambiante. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA. pp. 7 - 18.
- Baigorri H, Ciampitti I, García F. 2009. Como crece y se desarrolla el cultivo de soja. En: García F, Ciampitti I, Baigorri H. (Eds.). Manual de manejo del cultivo de soja. Buenos Aires: International Plant Nutrition Institute. pp. 7 - 16.
- Ball R, Purcell L, Vories E. 2000. Short-season Soybean yield compensation in response to population and water regime. *Crop Science*, 40: 1070 - 1078.
- Bryla D, Trout T, Ayars J. 2010. Weighing Lysimeters for developing crop coefficients and efficient irrigation practices for vegetable crops. *American Society for Horticultural Science*, 45 (11): 1597-1604.
- Burgos J, Corsi W. 1967. Constantes hidrológicas de dos suelos de pradera de Colonia. La Estanzuela, Uruguay: MGA/CIAAB (Ministerio de Ganadería y

Agricultura. Centro de Investigaciones Agrícolas "Alberto Boerger"). Boletín Técnico N° 6. 24 p.

Carnelli J. 2010. Riego en Agroenergía predial. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA. pp. 125 - 134.

Castaño J, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización Agroclimática del Uruguay-1980-2009. Serie Técnica no. 193. Montevideo: INIA. 134 p.

Ceretta S, Saldain N. 2005. Soja: Fecha de siembra x grupo de madurez. En: Jornada técnica de cultivos de verano. Serie Actividades de Difusión N° 417. Montevideo: INIA. pp. 21-24.

Chalmers D, Mitchell P, 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.

Decagon Devices. 2010. Manual del operador: ceptómetro Accupar, Modelo LP 80. Versión 10. Pullman, Washington. 100 p.

De Souza P, Egli D, Bruening W. 1997. Water stress during filling and leaf senescence in soybean. Agronomy Journal, 89: 807 - 812.

DIEA (Dirección Nacional de Estadísticas Agropecuarias). Producción Vegetal. 2015. En: Anuario Estadístico Agropecuario. [En línea]. 2015. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 215p. Consultado 22 marzo 2016. Disponible en:

<http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2015,O,es,0>,

Doorenbos J, Pruitt W. 1990. Las necesidades de agua de los cultivos. Roma: FAO. Estudio de Riego y Drenaje N° 24. 193 p.

Doorenbos J, Kassam A. 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO. Estudio de Riego y Drenaje N° 33. 211 p.

English M, Solomon K, Hoffman G. 2002. A paradigm Shift in Irrigation Management. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 128 (5): 267 - 277.

English M. 1990. Deficit Irrigation. I: Analytical Framework. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 116: 399 - 412.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. Sistema de Información Global sobre el agua. Aquastat. [En línea]. Verificado el 22 marzo 2016. Disponible en: [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/ury/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ury/indexesp.stm)

Fassio A , Ibáñez W, Rodríguez M, Ceretta S, Pérez O; Rabaza, Vergara G, Restaino E. 2013a. Modelo de predicción fenológica para el cultivo de soja (FENOSoja). Disponible en: <http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Alertas-y-herramientas/Utilidades#> Verificado el 30 junio de 2016.

Fassio A, Sawchik J, Gaso D. 2013b. Respuesta a la población de plantas: riego y seco 2012-2013. Estrategias para el manejo eficiente del agua en el cultivo.



En: Jornada Soja 4000: que nos falta? (1° Agosto 2013, Colonia, Uruguay).  
Estanzuela, Colonia, Uruguay: INIA.

Fehr W, Caviness C. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University of science and technology Cooperative Extension Service. Special Report. (En línea). Iowa, 80: 11 p. Verificado el 22 marzo 2016. Disponible en: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR\\_000g50w2l4s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR_000g50w2l4s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf).

Fehr W, Caviness C, Burmood D, Pennington J. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, 2: 929 - 932.

Fereres E, Soriano M. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58: 147 - 159.

García-Petillo M, Puppo L, Hayashi R, Morales P. 2012. Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. [En línea]. En: Seminario Internacional (2°, 2010, Salto, Uruguay). Riego en Cultivos y Pasturas. Verificado el 22 marzo 2016. Disponible en: <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/2-seminario-2012/Metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo-a-campo.pdf>. 10p.

Gasó D, Capurro M. 2015. Potential yield of contrasting soybean maturity groups in Southern Uruguayan conditions. En: Inter-regional CIGR Conference (3°, 2015, Colonia, Uruguay). Land and Water Challenges: Tools for developing "Dr. Mario García-Petillo". *Agrociencia Uruguay. Special Issue: ISSN 1510-0839*. P 36.

- Gasó D, Berger A, Sawchik J. 2014. Bases ecofisiológicas para minimizar las brechas de rendimiento en el cultivo de soja. En: Estrategias posibles en una coyuntura compleja. Jornada de cultivos de verano CREA 18 setiembre 2014, Mercedes, Uruguay: INIA. CREA.
- Giménez L. 2014a. Que sabemos del riego de cultivos en Uruguay? Y que falta por investigar. En: Seminario Internacional (3°, 2010, Paysandú, Uruguay). Riego en Cultivos y Pasturas. Montevideo: INIA. pp. 22-34.
- Giménez L. 2014b. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia Uruguay*, 18: 53 - 64.
- Giménez L. 2012. Cuanto estamos perdiendo por no regar los cultivos en Uruguay? En: Seminario Internacional (2°, 2010, Salto, Uruguay). Riego en Cultivos y Pasturas. Montevideo: INIA. pp. 33-41.
- Giménez L, García M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15: 100 - 108.
- Giménez L. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de maíz y soja. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA. pp. 29-37.
- Giménez L. 2005. Estudio Fenológico de diferentes grupos de madurez en soja ante variaciones ambientales producidas por fecha de siembra y localidad. En: Jornada técnica de cultivos de verano. La Estanzuela, Colonia: INIA. Serie Actividades de Difusión N° 417. pp. 13-16.

- Grasso J. 2015. Calibración y simulación del modelo de simulación de balance hídrico de suelos WINSAREG en soja. Tesis de Maestría. Montevideo, Uruguay. Universidad de La República, Facultad de Agronomía. 107 p.
- Haverkamp R, Vauclin M, 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 : january-april 1973. N° 2936. Paris, Francia: UNESCO. 140 p.
- Hillel, D. 2004. Introduction to environmental soil physics. Elsevier Academic Press, New York. 494 p.
- Hsiao T. 1990. Fisiología general. En: Curso Internacional de manejo de agua en frutales. 1990. Departamento de Ingeniería Agrícola. Facultad de Ciencias Agronómicas, Veterinarias y Forestales. Universidad de Concepción, Chillan, Chile. 1: 1 - 17.
- Kadhem F, Specht J, 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, Roupael Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 75: 226 - 244.
- Kuss R, 2006. Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja. Dissertação de Maestría. Rio Grande del Sur, Brasil: Universidade Federal de Santa María. Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo. 80 p.

- Mandl F. 1994. Tipo de cultivares y época de siembra. En: Giménez A, Restaino E. (Eds.). Girasol y Soja: algunos aspectos tecnológicos de producción para el litoral oeste de Uruguay. Montevideo, Uruguay: INIA. Boletín de Divulgación N° 47. pp. 105-108.
- Martin D, Dorn T, Melvin S, Corr A, Kranz W. 2011. Evaluating energy use for pumping irrigation water. In. Annual central plains irrigation conference (23<sup>rd</sup>, 2011, Burlington, Colorado). Proceedings. Colby, Kansas. pp. 104 - 116.
- MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2015. Estrategia de fomento del desarrollo de la agricultura regada en Uruguay. Resumen Ejecutivo. Montevideo. 35 p.
- Molfino J, Califra A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay. Segunda aproximación. [En línea]. Montevideo: MGAP. (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). División de Suelos y Aguas, Dirección General de Recursos Naturales Renovables, 12 p. Verificado el 22 marzo 2016. Disponible en: [http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files\\_mf/1395761584AguadisponibleenSuelosdelUruguayversioncorr.pdf](http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files_mf/1395761584AguadisponibleenSuelosdelUruguayversioncorr.pdf)
- Molino J. 2001. Estrés térmico por alta temperatura en soja (*Glycine max*(L.) Merr.): análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación de rendimiento. Tesis de Maestría. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires. 66 p.

- Oosterhuis D, Walker S. 1987. Stomatal resistance measurement as an indicator of water deficit stress in wheat and soybeans. *South African Journal of Plant and Soil*, 4(3): 113 - 120.
- Pereira L, Juan Valero J, Picornel M, Tarjuelo J. 2010. *El riego y sus tecnologías*. Lisboa: Europa América. 296 p.
- Puppo L, García C, Girona J, 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. 1956. Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20(3): 301 - 303.
- Richards L. 1948. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*, 68: 95 - 112.
- Rosadi B, Afandi A, Senge M, Ito K, Adomako J. 2005. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. *Paddy and Water Environment*, 3: 219-223.
- Salvagiotti F. 2014. Bases para el manejo nutricional en maíz y soja de alto rendimiento. En: *Seminario Internacional (3°, 2010, Paysandú, Uruguay). Riego en Cultivos y Pasturas*. Montevideo: INIA. pp. 37-41.
- Sawchik J, 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*. Montevideo: INIA. Serie Actividades de Difusión N° 417. pp. 41-45.

- Seckler D, Molden D, Sakthivadivel. 2003. The concept of efficiency in water resources management and policy. In: Kijne J, Barker R, Molden D. (Eds.). 2003. Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. CAB International, Sri Lanka, 3: 37-51.
- Silva A, Ponce de Leon J, García F, Duran A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. Boletín de Investigación N° 10. 20 p.
- Sincik, M, Candogan B, Demirtas C, Buyukcangaz H, Yazgan S, Goksoy A. 2008. Deficit irrigation of soybean [*Glicine Max (L) Merr.*] in a sub-humid climate. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 194: 200 - 205.
- Smith M, Steduto P. 2012. Yield response to water: the original FAO water production function. En: Steduto P, Hsiao T, Fereres E. Raes. (Eds.). *Crop yield response to water*. Rome: FAO. Irrigation and drainage paper N° 66. pp 6-13.
- Specht J, Williams J, Weidenbenner C. 1986. Differential responses of soybean genotypes subjected to a seasonal soil water gradient. *Crop Science*, 26: 922 - 933.
- Teare I, Kanemasu E. 1972. Stomatal diffusion resistance and water potential of soybean and sorghum leaves. *New Phytologist*, 71: 805 - 810.
- Torrion J, Setiyono T, Graef G, Cassman K, Irmak S, Specht J. 2015. Soybean Irrigation Management: Agronomic impacts of deferred, deficit and full-season strategies. *Crop Science*, 54: 2782 - 2795.

Trout T, Bausch W, Buchleiter G. 2010. Does deficit irrigation give more crop per drop?. Annual central plains irrigation conference (22<sup>nd</sup>, 2010, Kearney, Nebraska). Proceedings. Kearney, Nebraska. Pp. 36 - 40.

Wani S, Heng L, Vajja N. 2012. Soybean. En: Steduto P, Hsiao T, Fereres E. Raes. (Eds.). Crop yield response to water. Rome: FAO. Irrigation and drainage paper N° 66. pp. 124 - 131.

## 6. ANEXOS

### 6.1. La Estanzuela

#### 6.1.1. Caracterización climática

Para caracterizar el año de evaluación se presentan los parámetros climáticos temperatura, hora sol (hs), humedad y precipitación registrados en la estación experimental, en comparación a los promedios históricos desde 1965-2016. Se analizaron además las precipitaciones.

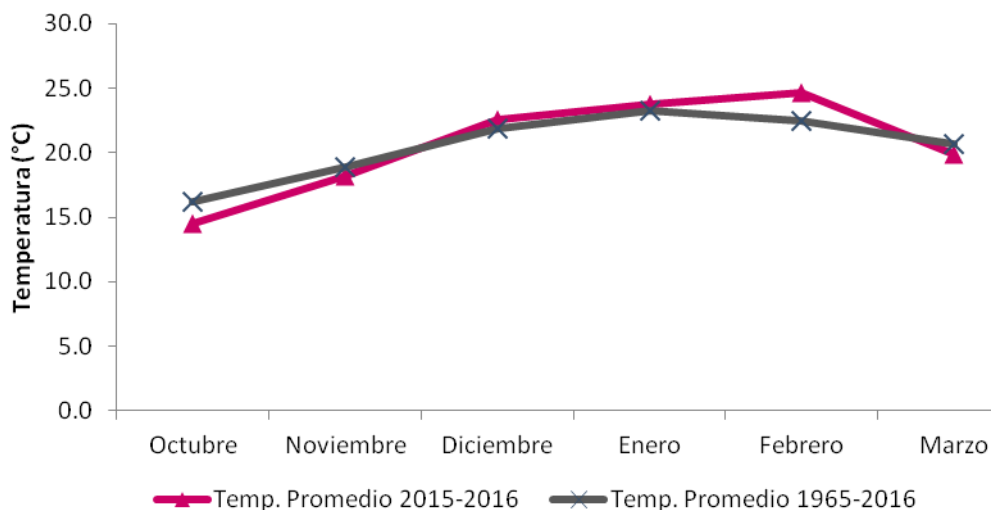


Figura 35. Temperatura media promedio mensual para la zafra y para la serie histórica

La temperatura media mensual en la zafra se encontró cercana al promedio histórico. El mes de febrero fue el que registró la temperatura media más alta, 24,6 °C, un poco más cálido en relación al promedio (Figura 3).



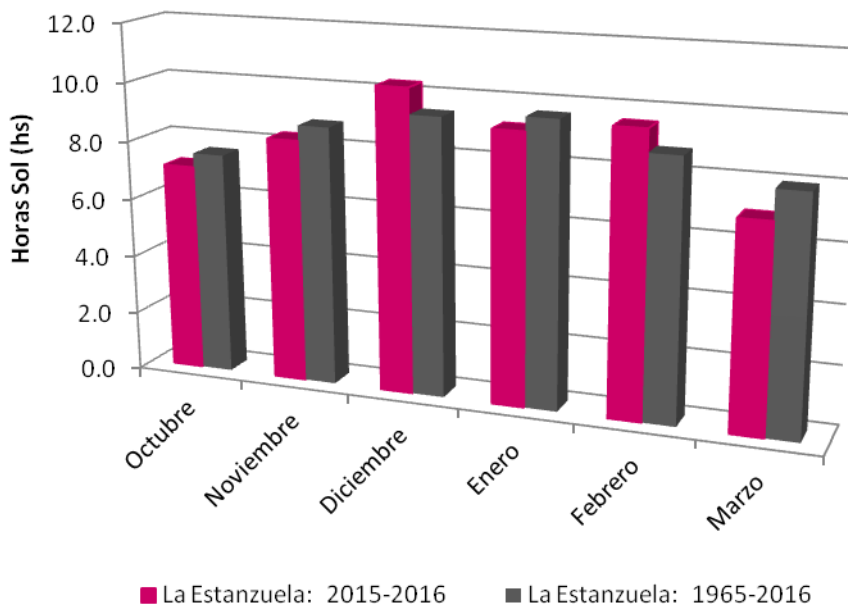


Figura 36. Horas sol promedio mensuales para la zafra y para la serie histórica

En los meses de diciembre y febrero las horas sol promedio mensuales fueron un poco mayor al promedio, mientras que en octubre, noviembre, enero y marzo se registraron valores un poco menores al promedio histórico (Figura 4). El mes con mayor horas sol fue diciembre (10,3 hs), siguiendo enero y febrero (9,2 hs y 9,5 hs, respectivamente).

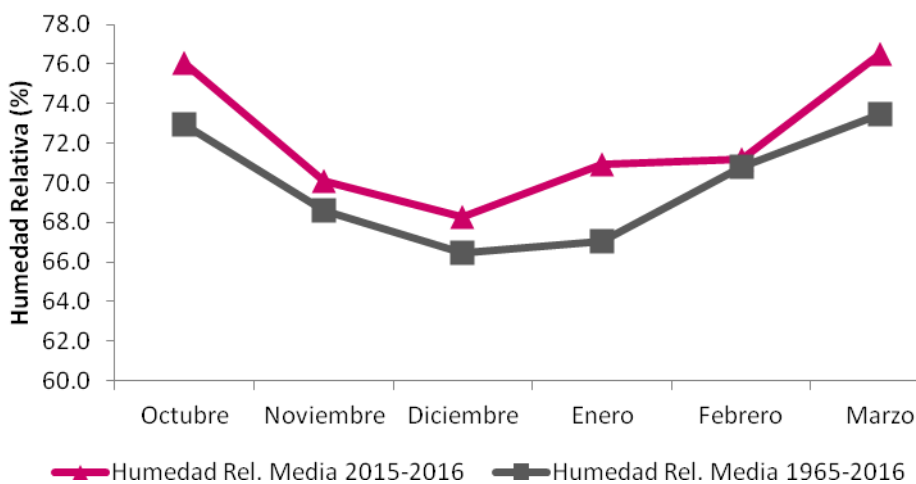


Figura 37. Humedad relativa promedio mensual para la zafra y para la serie histórica.

La humedad relativa media mensual durante la zafra se encontró por encima del promedio histórico, con un mínimo del 68,3 % en diciembre (Figura 5) y máximo en octubre y marzo (76 % y 76,5 %, respectivamente).

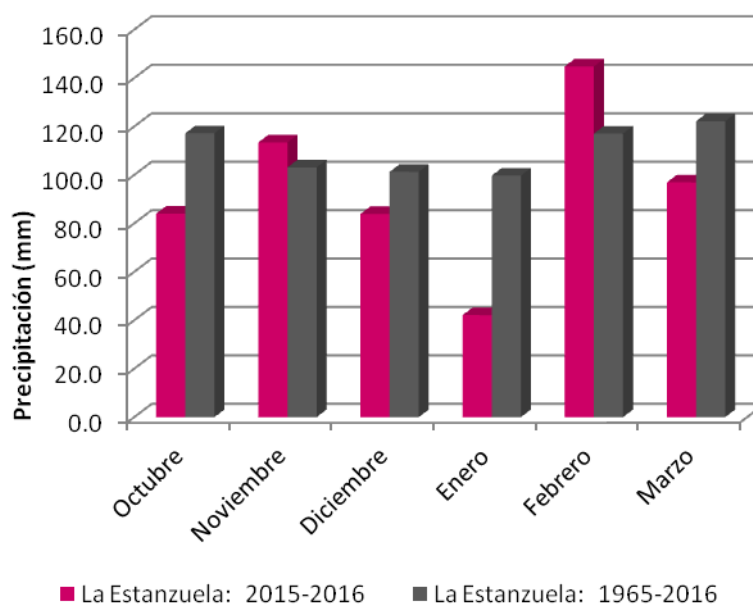


Figura 38. Precipitación acumulada mensual para la zafra y acumulada promedio para la serie histórica

La precipitación acumulada mensual durante la zafra presentó dos meses con precipitaciones mayores al promedio histórico, noviembre y febrero, mientras que el resto de los meses estuvieron por debajo del promedio histórico (Figura 6). El mes de enero presentó la menor precipitación acumulada mensual, registrando 42,1 mm.

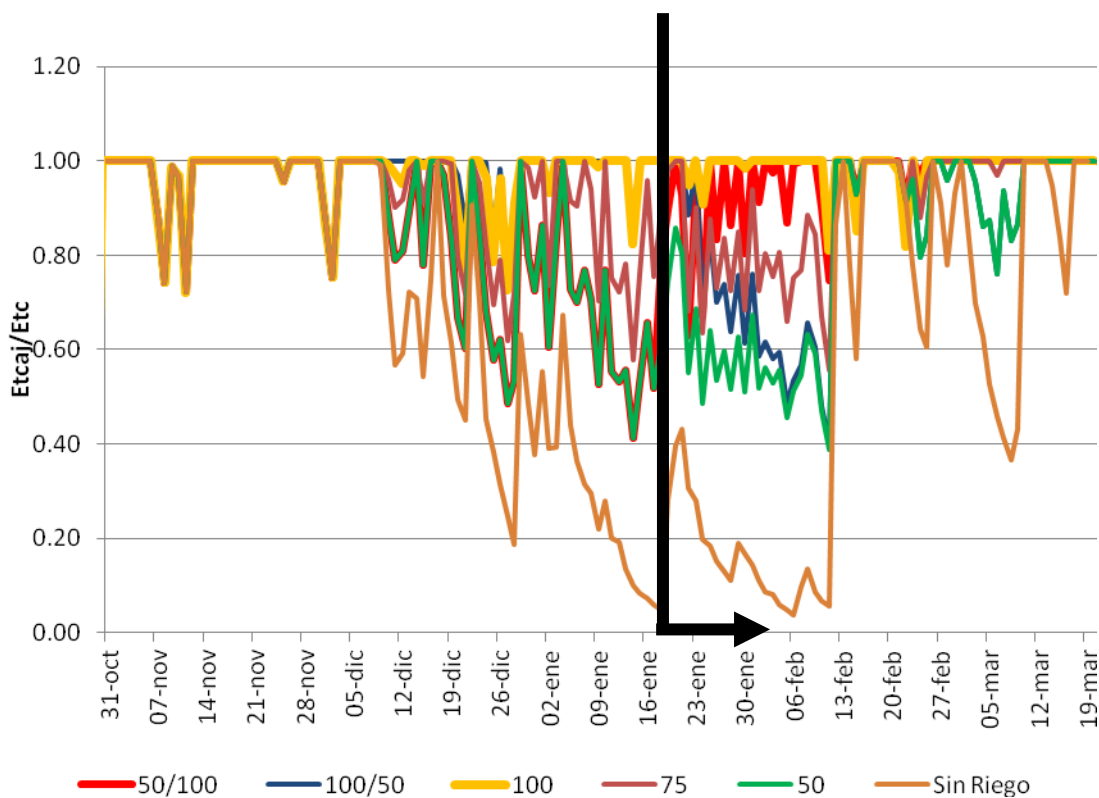


Figura 39. Evolución del índice de bienestar hídrico durante el ciclo según tratamiento

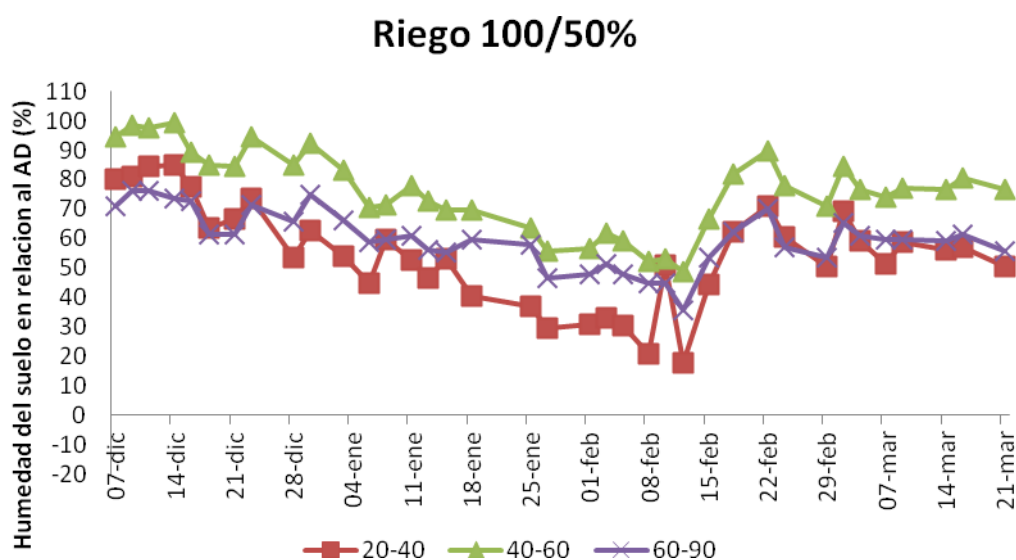


Figura 40. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 100/50 % en La Estanzuela

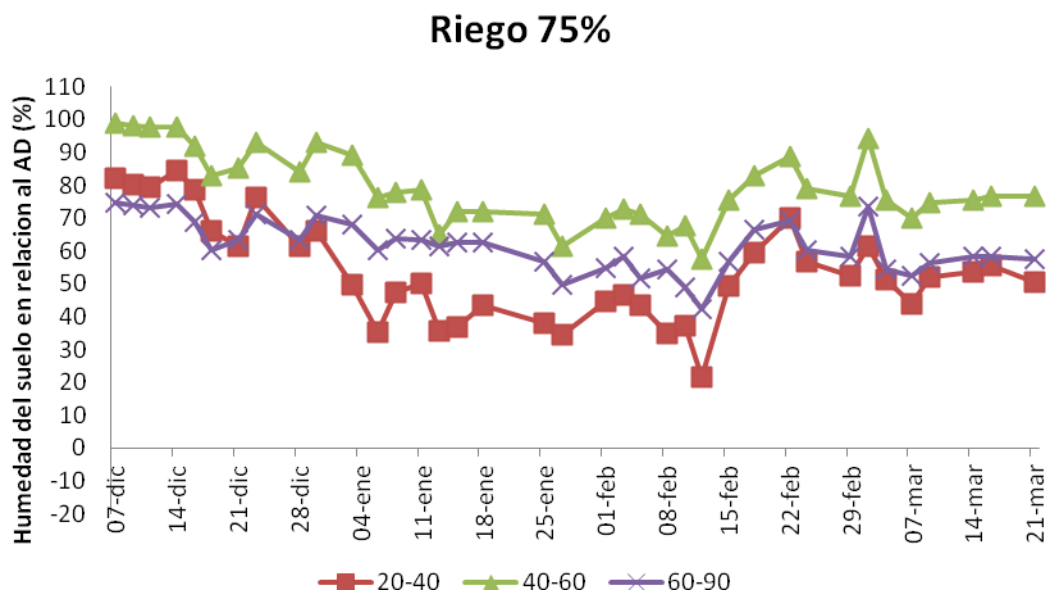


Figura 41. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 75 % en La Estanzuela

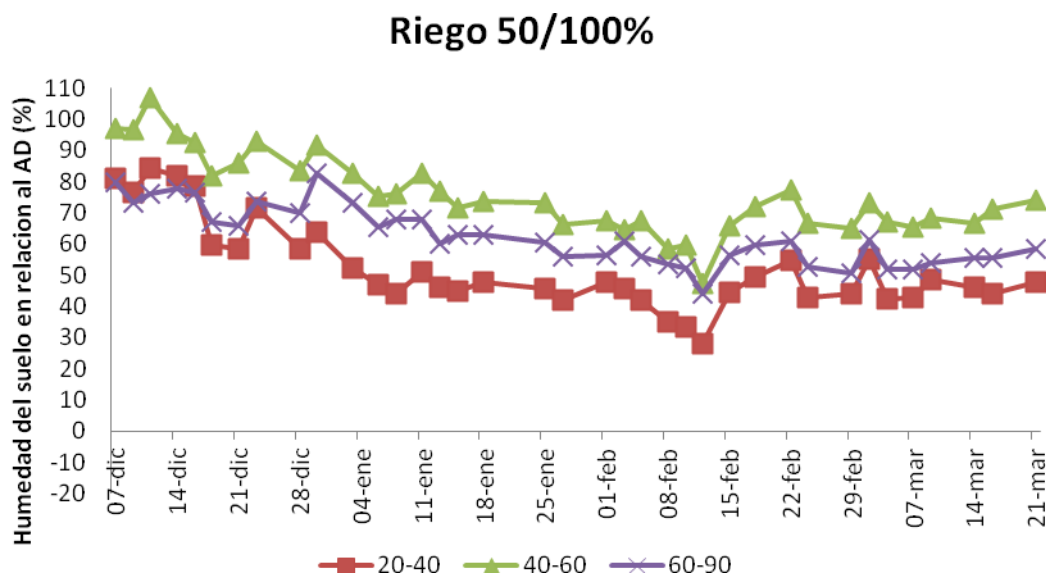


Figura 42. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 50/100 % en La Estanzuela

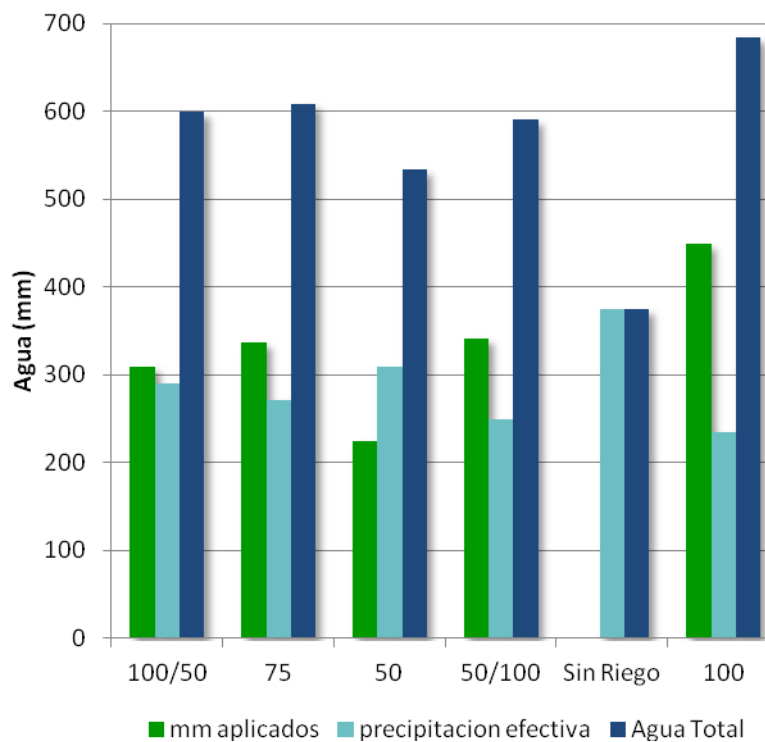


Figura 43. Cantidad de agua aplicada, precipitación efectiva y agua total según tratamiento

Cuadro 16. Número de nudos por planta, número de vainas por planta y número de granos por vaina para cada tratamiento.

Tratamiento	N° nudos por planta	N° vainas por planta	Vainas 3 granos	Vainas 2 granos	Vainas 1 grano
			-----%-----		
100/50	19	66	17	59	17
75	19	57	20	57	17
50	18	67	17	52	19
50/100	19	62	20	57	17
Sin Riego	15	41	18	49	26
100	20	67	18	61	17

## 6.2. Las Brujas

### 6.2.1. Caracterización climática

Se analizó el promedio mensual de la zafra 2015-2016 y del promedio histórico 1972-2016 de los principales parámetros climáticos que influyen sobre la ET, temperatura, horas sol, humedad y viento. Se analizaron además las precipitaciones.

La temperatura media mensual en la zafra se encontró un poco por encima del promedio histórico para los meses de diciembre y enero (Figura 28). El mes de abril fue el que registró la mayor temperatura media (21,2 °C), un poco más cálida en relación al promedio (17,2 °C). Por el contrario los meses de febrero y marzo registraron temperaturas menores al promedio histórico (19,6 °C y 16,9 °C en relación a 22,4 °C y 20,7 °C, respectivamente).

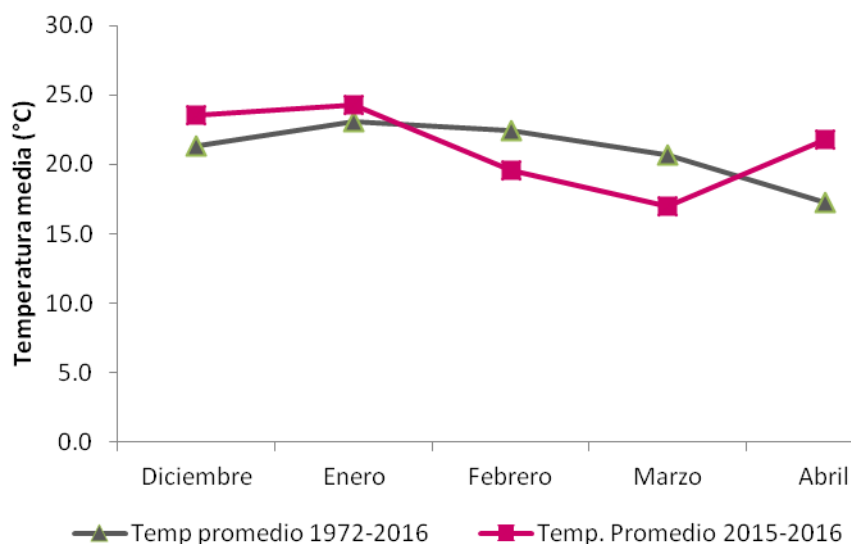


Figura 44. Temperatura media promedio mensual para la zafra y para la serie histórica

Las horas sol promedio mensuales, mostraron un diciembre y enero cercano al promedio histórico pero los meses de febrero y marzo tuvieron mucho menos horas sol respecto al promedio (Figura 29). El mes con mayor horas sol al promedio fue abril (10 hs), siendo muy similar a diciembre (10,3 hs) y enero (9,6 hs).

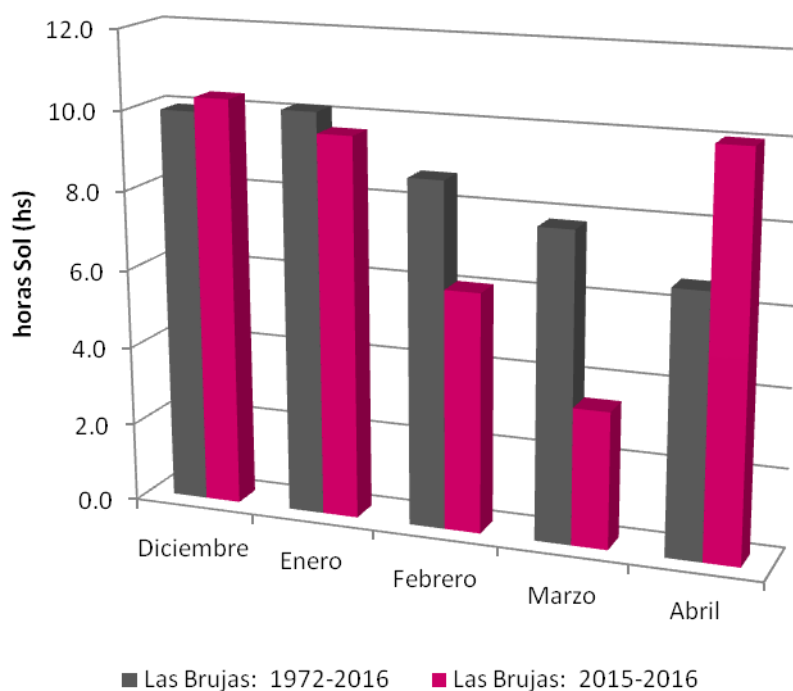


Figura 45. Horas sol promedio mensuales para la zafra y para la serie histórica

La humedad relativa media mensual durante la zafra se encontró un poco por encima del promedio histórico, para los meses de febrero y marzo (74 % y 80 %, respectivamente), con valores similares al promedio para diciembre y marzo. El valor que estuvo por debajo del promedio histórico fue abril (65,4 % respecto a 77,5 %), un mínimo del 68,3 % en diciembre (Figura 30) y máximo en octubre y marzo (76 % y 76,5 %, respectivamente).

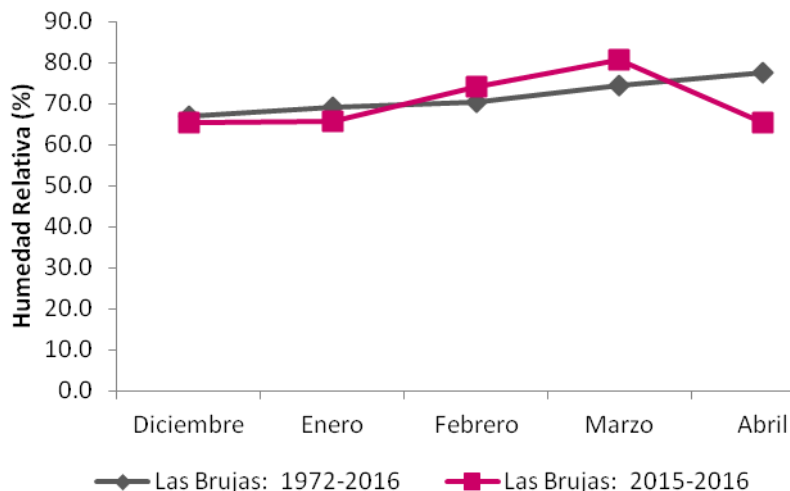


Figura 46. Humedad relativa promedio mensual para la zafra y para la serie Histórica

La precipitación acumulada mensual durante la zafra presentó el mes de diciembre con precipitaciones acumuladas similares al promedio histórico (131 mm respecto a 116 mm) y bastante mayores en el mes de abril (251 mm respecto a 151 mm). El resto de los meses estuvieron por debajo del promedio histórico (Figura 31). El mes de enero presentó la menor precipitación acumulada mensual, registrando 11 mm acumulados.

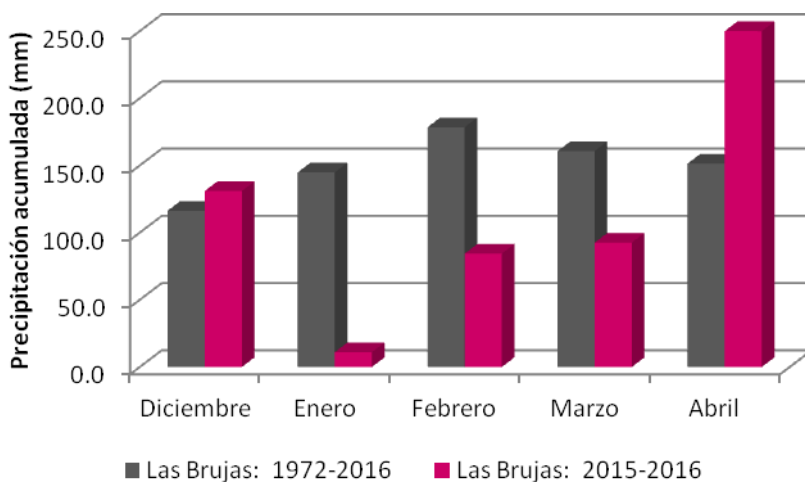


Figura 47. Precipitación acumulada mensual para la zafra y acumulada promedio para la serie histórica



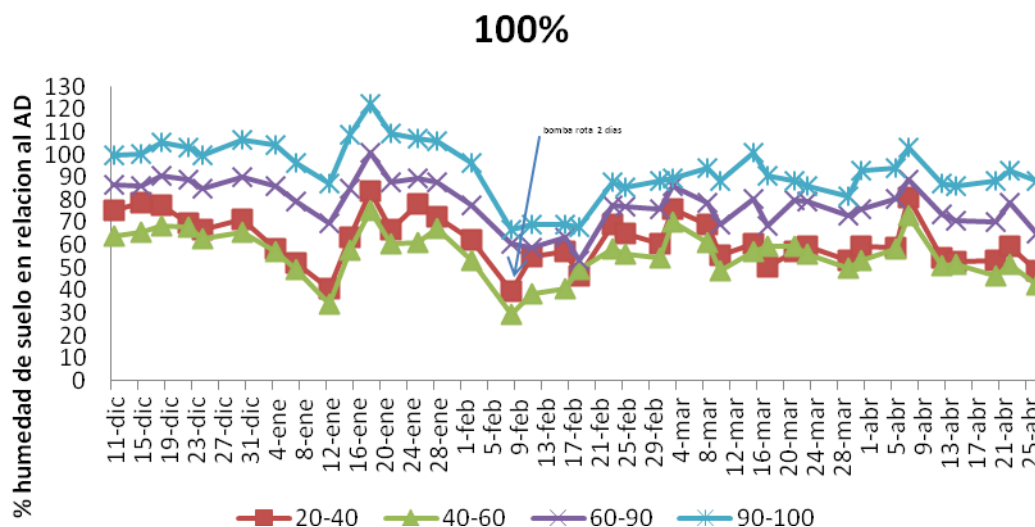


Figura 48. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 100 % en Las Brujas

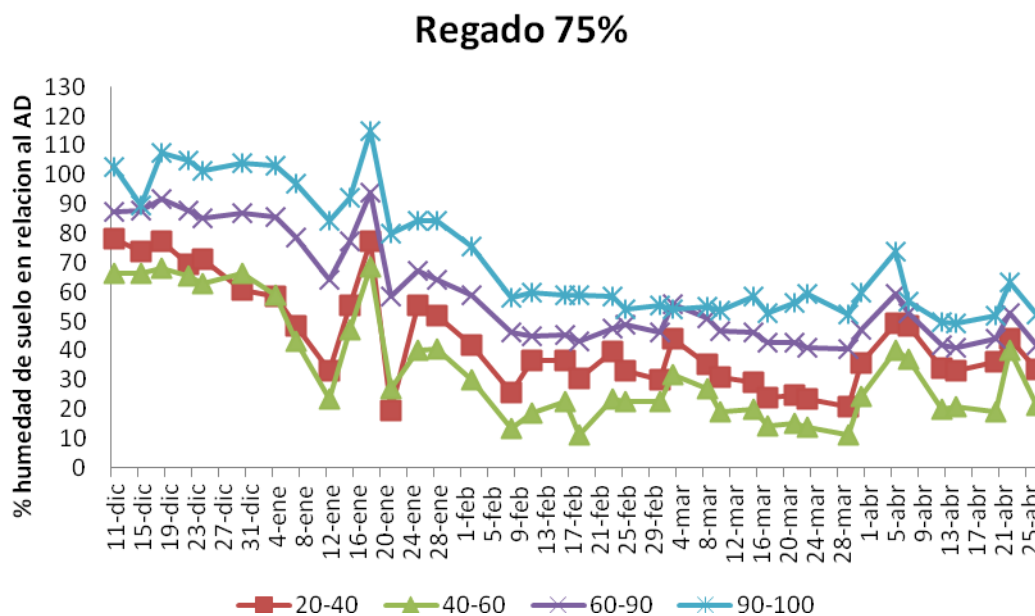


Figura 49. Evolución del contenido de agua del suelo en relación al agua disponible por horizonte para el tratamiento 75 % en Las Brujas

Cuadro 17. Número de nudos por planta, número de vainas por planta y número de granos por vaina para cada tratamiento.

Tratamiento	N° nudos por planta	N° vainas por planta	Vainas 3	Vainas 2	Vainas 1
			granos	granos	grano
			----- % -----		
100	21	85	5	32	30
75	20	46	3	31	33
50	18	44	4	35	30
50/100	23	93	6	34	30

### 6.3. Respuesta del rendimiento al agua en el cultivo de soja\*

Capurro, M<sup>a</sup>. Cristina<sup>1</sup>, Beretta Andrés<sup>1</sup>, García Claudio<sup>2</sup>, Sawchik Jorge<sup>1</sup>, Puppo Lucia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). La Estanzuela, Ruta 50, Km. 11, 70006 Colonia, Uruguay. Correo electrónico: [mcapurro@inia.org.uy](mailto:mcapurro@inia.org.uy)*

<sup>2</sup>*Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Las Brujas, Ruta 48, Km 10, 90200 Canelones, Uruguay.*

<sup>3</sup>*Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780. 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: [lpuppo@fagro.edu.uy](mailto:lpuppo@fagro.edu.uy)*

Respuesta al riego en el cultivo de soja

#### 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 las precipitaciones, 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

\* Se publicará en Agrocencia Uruguay

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 nuestras condiciones, 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

### **Summary**

In Uruguay, climatic conditions and soil water availability determine periods where evapotranspiration (ET) exceeds precipitation. Due to our interannual rainfall variability, this situation worsens and yield losses occur caused by the reduced available water for crops. Irrigation to meet the requirements of ET needs large amounts of water. The irrigation strategy of water application below the requirements for maximum ET is defined as deficit irrigation (DI). This strategy increases water productivity. The technique known as regulated deficit irrigation (RDI), which considers the development stages sensitivity 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, affecting mainly the number of reproductive structures per unit area. RDI irrigation strategy showed to be an alternative that in our 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 en el Uruguay. Dentro de éstos el cultivo de soja ha tenido el mayor aumento en área sembrada, siendo hoy uno de los principales cultivos agrícolas del país con un área ocupada, de 1.334.000 ha y un rendimiento promedio de 2.331 kg ha<sup>-1</sup> de grano que es exportado en su mayoría (DIEA 2015).

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 las precipitaciones (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 a las lluvias 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 (Fererres 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 m<sup>3</sup> de agua consumida, además de 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 et al., 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 et al., 1985; Andriani et al., 1991; Andriani, 2006; Wani et al., 2012). Varios autores encontraron que la ocurrencia de déficit hídrico durante R<sub>4</sub>-R<sub>6</sub> tuvo mayores detrimentos en el rendimiento de grano que en el período R<sub>1</sub>-R<sub>4</sub>. 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 basa en la aplicación de distintas técnicas de riego y cantidades de agua para estudiar sus consecuencias en el cultivo de soja. Este trabajo tiene como objetivos: 1) Evaluar la respuesta en rendimiento del cultivo, a tres niveles de humedad durante todo el ciclo del cultivo y a una combinación de dos niveles de humedad durante el desarrollo vegetativo hasta inicio de R<sub>4</sub> y desde R<sub>4</sub> a R<sub>7</sub>; y ajustar la función rendimiento-dosis de agua 2) Evaluar el umbral de riego expresado como agotamiento de agua disponible para la soja cultivada en un Brunosol éútrico típico. 3) Evaluar la utilización del balance hídrico diario según la metodología descrita en la Guía FAO N°56, 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, en un suelo caracterizado como un Brunosol éútrico típico; 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, con un suelo caracterizado como un Brunosol éútrico típico. En el

primer sitio se realizó un experimento a campo y en el segundo sitio se utilizaron 12 lisímetros 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 (Torrion 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<sup>-1</sup>. En ambos sitios se aseguró el control total de malezas, plagas y enfermedades de manera de que éstas 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 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 experimental se realizó la caracterización hídrica del suelo. Se determinaron los parámetros: contenido de agua a punto de marchitez permanente (PMP), contenido de agua a capacidad de campo (CC) y contenido de agua disponible en el suelo (AD). Para determinar CC 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 éstas variables se determinaron también mediante las ollas de presión según la metodología de Richards (1948), Richards, (1956), para Las Brujas 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 en cada parcela y sitio. La evolución del  $K_c$  estimado de 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 4300 y CPN SG, en La Estanzuela y Las Brujas respectivamente. 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 2 a 3 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 et al. (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 ( $ET_o$ ) 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  $ET_o$  por el  $K_c$ .

Se determino semanalmente para todas las parcelas y en ambos sitios las variables: porcentaje de cobertura del suelo (CC) mediante la medición de la intercepción de luz utilizando un ceptómetro; y conductancia estomática, mediante un porómetro. Al momento de cosecha se determinó el rendimiento de grano y los componentes del rendimiento.

#### *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 3 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 siembra hasta que el cultivo culmina el estadio  $R_3$ . El momento 2 se definió como el periodo crítico (PC), entre inicios de  $R_4$  hasta  $R_7$ .

#### 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 1,8 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 construida 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 5 filas dentro de cada lisímetro. El diseño experimental fue en parcelas al azar con 3 repeticiones. Los tratamientos instalados fueron: uno satisfaciendo el 100 % de la  $ET_c$  (100 %); dos tratamientos con riego deficitario continuo, satisfaciendo el 75 % (75 %) y otro satisfaciendo el 50 % (50 %) de la  $ET_c$ ; un tratamiento de RDC, satisfaciendo el 100 % de la  $ET_c$  durante el momento 1 y el 50 % 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 varianzas (ANAVA) 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 planteó el contraste entre los tratamientos 75 % vs 50/100 % debido a que ambos presentaron una cantidad similar de agua total efectiva pero aplicada en distintos momentos. Para los análisis de varianza se consideró al momento de riego como variable discreta y la cantidad de agua como variable continua. En el ANAVA del sitio La Estanzuela y en el conjunto de ambos sitios también se incluyó el efecto bloque. Para el ANAVA conjunto de ambos sitios, se consideró al sitio Las Brujas como un cuarto bloque.

En La Estanzuela el aumento de rendimiento en función del agua total efectiva se modeló como una función lineal plus plateau y en Las Brujas se modeló como una función lineal. Para estos ajustes se utilizaron las herramientas análisis de datos y solver de software Microsoft Excel.

## **Resultados y discusión**

Las condiciones ambientales produjeron escenarios de alta demanda hídrica en ambos sitios. En La Estanzuela se registraron  $ET_0$  acumuladas de 252 mm y 475 mm para los períodos desde siembra a  $R_1$  y desde  $R_1$  a  $R_7$ , respectivamente. Para el período entre  $R_4$  a  $R_7$  la acumulada fue de 316 mm. El período reproductivo y gran parte del PC, coincidieron con los momentos de menor precipitación acumulada. Desde  $R_1$  hasta el período cercano a  $R_6$  se registraron 70 mm de lluvia acumulada (desde el 18 de diciembre al 11 de febrero). Desde el 11 de febrero ( $R_5$ ) hasta  $R_7$  se registraron 233 mm acumulados. Las precipitaciones estuvieron por lo tanto, 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 nuestras condiciones (sur del Uruguay) existe un 80 % probabilidad de que lluevan más de 240 mm en el período desde noviembre 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.

En Las Brujas se encontraron  $ET_o$  acumuladas de 238 mm y 407 mm para los períodos desde siembra a  $R_1$  y desde  $R_1$  a  $R_7$ , respectivamente y de 275 mm desde  $R_4$  a  $R_7$ .

*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 manejaron 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. Por otro lado, al medir la conductancia estomática se evidenció que la misma se ve claramente afectada por el contenido de agua del suelo. Esta medida también reflejó los diferentes manejos de riego.

La profundidad de 0 a 20 cm registró valores fuera de lo normal debido a la evaporación directa del suelo, por lo que esta profundidad no se tomo en consideración.

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.

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 la profundidad de 20 a 60 cm (cuando el cultivo se encontraba en  $R_2$ ). Se mantuvo relativamente estable en ese rango durante 40 días hasta  $R_5$ . El agotamiento en el tratamiento 50 % también alcanzó niveles similares, sin embargo en el tratamiento sin riego el agotamiento se mantuvo por más tiempo.

El seguimiento de los estados fenológicos semanales mostró que la fenología se vio afectada por las deficiencias hídricas. Se evidenció un adelanto en la maduración del cultivo provocado por el estrés hídrico a partir de R<sub>4</sub>.

La ET<sub>c</sub> tuvo una evolución similar a la evolución de la ET<sub>o</sub> debido a que es consecuencia de la misma y de la evolución del K<sub>c</sub>. Se encontraron picos de máximo consumo entorno a R<sub>2</sub> y a R<sub>4</sub> (Figura 1). Se utilizó un K<sub>c</sub> inicial de 0,5, valor de tabla propuesto por Allen et al. (1998).

La duración de las fases fenológicas para estimar la evolución del K<sub>c</sub> guardó relación con las medidas de CC (Figura 1). 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 R<sub>2</sub>, 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 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 R<sub>1</sub> y R<sub>2</sub>, coincidiendo con Allen et al (1998), quienes identifican a la floración como el momento en donde se alcanza el 80 % de cobertura del suelo.

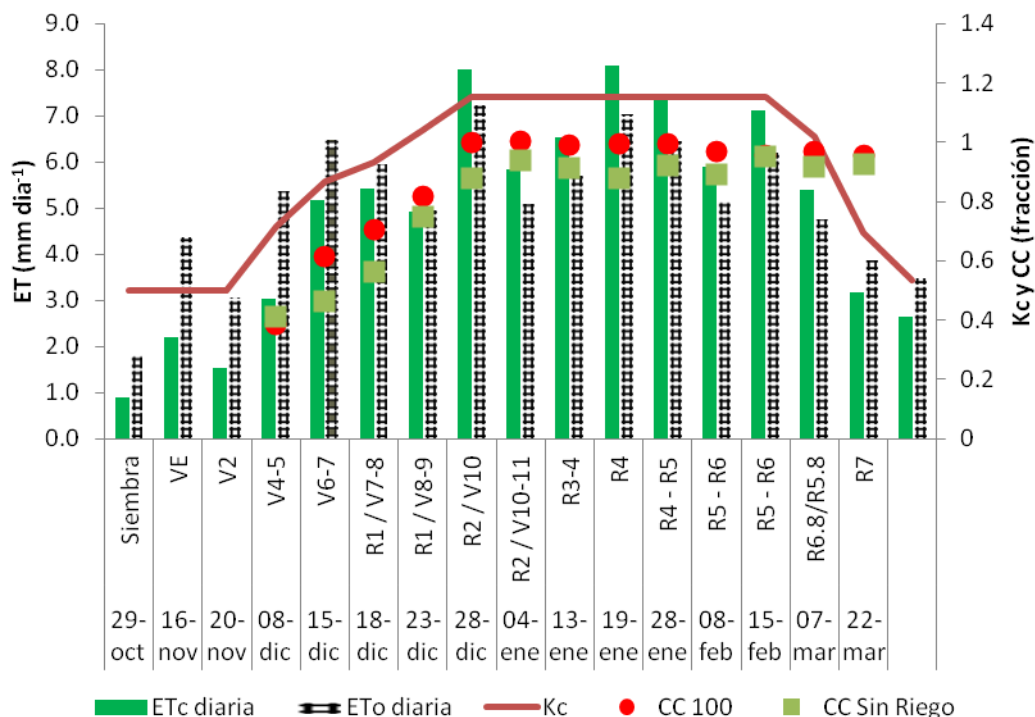


Figura 1. Evolución según el estado fenológico de los valores promedio diarios de  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $K_c$ , y cobertura del suelo (CC) en los tratamientos 100 % y sin riego en la estación experimental INIA La Estanzuela

La ET del cultivo se reduce como consecuencia de las deficiencias hídricas del suelo,  $ET_{c_{aj}}$  (Figura 2). 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 estará limitada por el agua disponible (lluvias y riego) (Allen et al, 1998).

Las mayores reducciones respecto a la  $ET_c$  sin restricciones fueron del 47 % para el tratamiento sin riego y del 22 % para el tratamiento 50 %. Los tratamientos 100/50 %, 75 % y 50/100 % presentaron reducciones de la  $ET_c$  entre 10 y 14 %. Por otro lado, se observa también el aumento en la  $ET_c$  en el tratamiento 50/100 % luego de R4, momento en el que se cambia la estrategia de riego hacia una situación progresiva de confort hídrico (Figura 2).

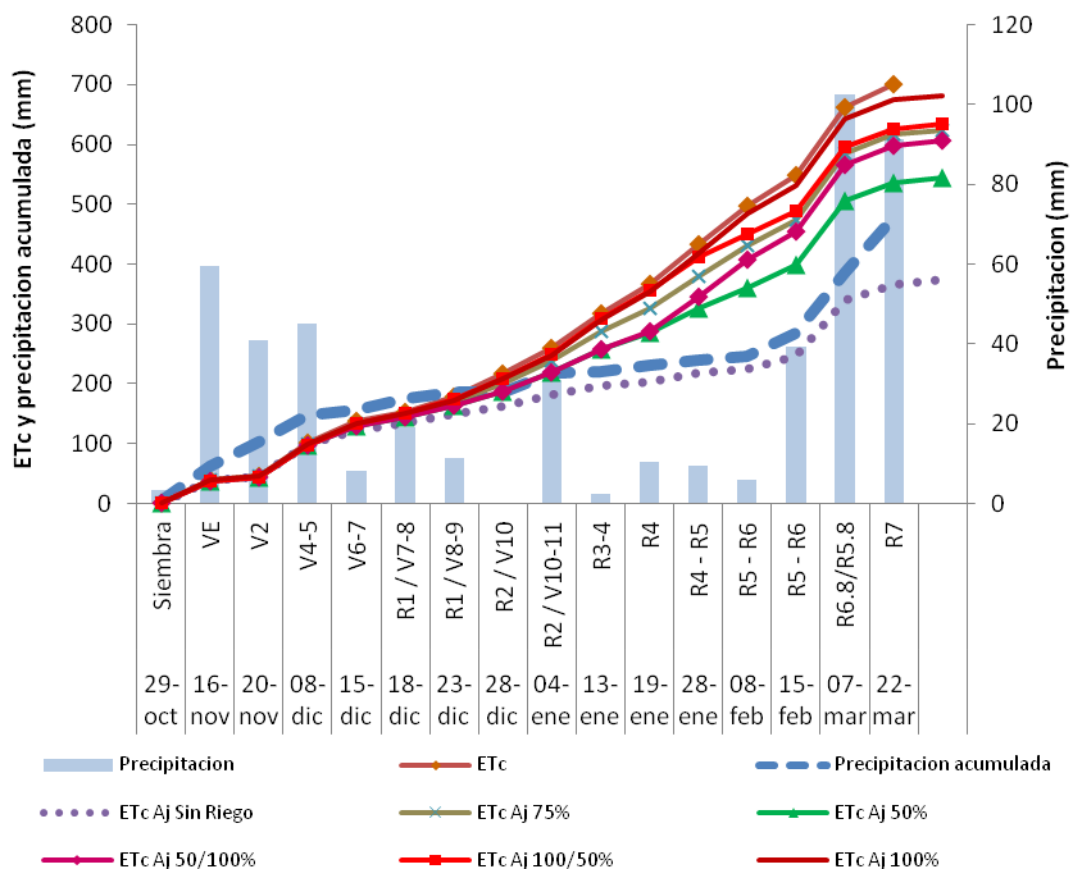


Figura 2. Evolución de la  $ET_c$ ,  $ET_{c\ aj}$  y precipitación acumuladas durante el ciclo del cultivo y precipitación acumulada para cada etapa fenológica para la estación experimental INIA La Estanzuela.

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 2).

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 156 mm y respecto al 50/100 % fue de 95 mm.

Cuadro 1. 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 <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	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

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. La respuesta del rendimiento al agua efectiva total se comportó como un modelo lineal plateau (Cuadro 1), con un máximo rendimiento de 5309 kg ha<sup>-1</sup> y 584 mm de agua total efectiva. El máximo rendimiento alcanzado fue de 5700 kg ha<sup>-1</sup> tratamiento 50/100 %, siendo estadísticamente igual al 100 %, 5444 kg ha<sup>-1</sup>, (p=0,70). Los tratamientos 100/50 y 75 % fueron también iguales al 100 %, rindiendo 5200 kg ha<sup>-1</sup> y 5050 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. Los menores rendimientos se encontraron para los tratamientos 50 % y sin riego, con 4790 kg ha<sup>-1</sup> y 3200 kg ha<sup>-1</sup>.

Las lluvias ocurridas en el mes de febrero (mencionado anteriormente) no lograron compensar las pérdidas en rendimiento consecuencia del déficit hídrico previamente ocasionada, tanto para el tratamiento sin riego, como para el tratamiento 50 %, los cuales tuvieron menores rendimientos. Las lluvias sin embargo revirtieron los efectos del déficit principalmente al tratamiento 75 % y tratamiento 100/50 %, los cuales no presentaron diferencias en rendimiento respecto al 100 % (p=0,71; p=0,94, respectivamente).

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 estimada mediante balance hídrico de agua de lluvia no aprovechada por el cultivo varió entre 250 mm y 107 mm para los tratamientos 100 % y sin riego.

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 una agotamiento promedio del 23 % y 41 % para las profundidades de 20 a 40 cm y de 20 a 60 cm respectivamente, por lo que se evidenció un correcto manejo del riego objetivo. El resto de los tratamientos de riego se manejaron, de igual forma que en La Estanzuela, con un agregado de agua de riego en relación a este tratamiento, provocando un déficit progresivo del agua del suelo. No solo el monitoreo de la humedad en el suelo evidenció los manejo de los riegos en los distintos tratamientos, sino también la conductancia estomática. Estas medidas se ven afectadas como consecuencia del efecto del contenido de agua del suelo en la planta.

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 3, la demanda atmosférica,  $ET_0$ , fue elevada durante diciembre y enero. La  $ET_c$  estimada tuvo una evolución en donde se encontró un máximo en el período 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  $R_{4/5}$ .



Mediante la fenología y la cobertura se ajustó la evolución del  $K_c$  (Figura 4). 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 2 días.

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

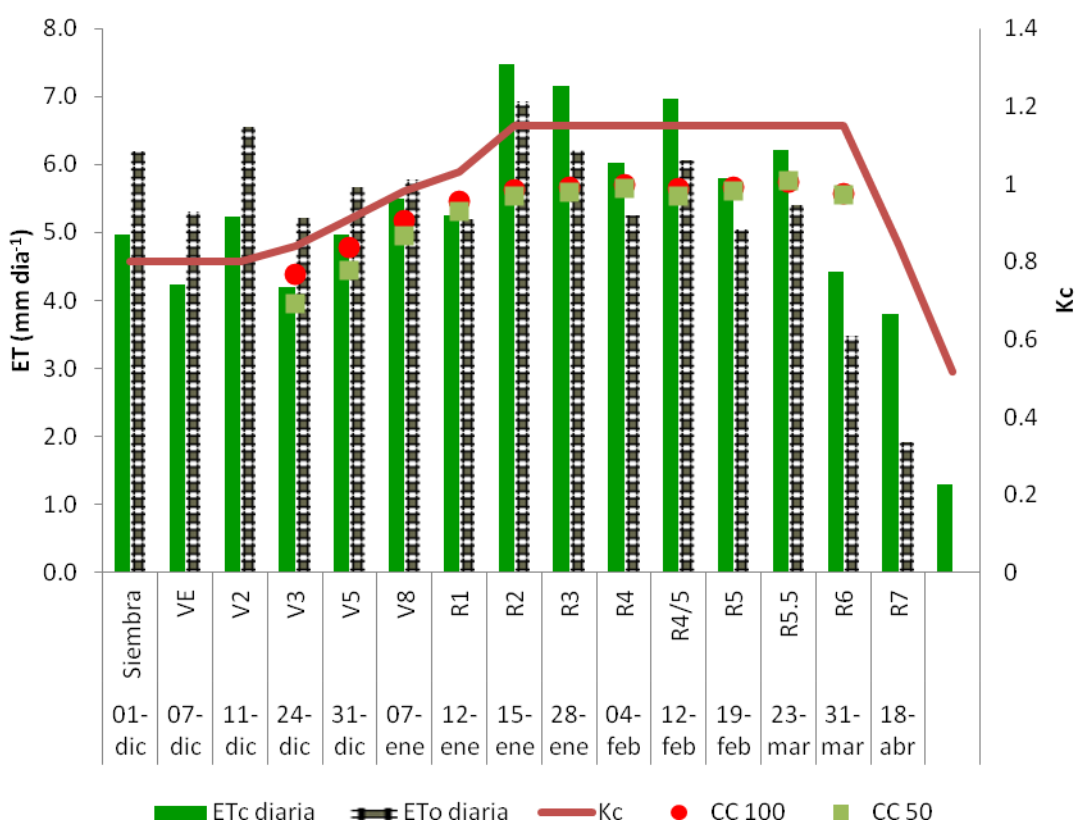


Figura 3. Evolución según el estado fenológico de los valores promedio diarios de  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $K_c$ , y cobertura del suelo (CC) en los tratamientos 100 % y sin riego en la estación experimental INIA Las Brujas

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 estimada para Las Brujas varió entre 368 mm y 626 mm para los tratamientos 50 % y 100 % respectivamente. Los tratamientos 75 % y 50/100 % mostraron ET 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 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 distribuida 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 la Cuadro 1. El máximo rendimiento alcanzado fueron los tratamientos 100 % ( $4500 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y el tratamiento 50/100 % ( $3800 \text{ kg ha}^{-1}$ ) los cuales fueron estadísticamente iguales ( $p= 0.11$ ) pese a la mayor cantidad de agua total efectiva del tratamiento 100 %. Los rendimientos para los tratamientos 75 % y 50 % fueron de  $3300 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $2800 \text{ kg ha}^{-1}$  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.

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 y de  $\text{CO}_2$ , 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  $R^2$  de 0,68 (Figura 4). Los resultados indicaron que existió una respuesta lineal al agregado de agua hasta los 590 mm, con un rendimiento máximo de 5000 kg ha<sup>-1</sup>. A partir de este punto no hay aumentos en rendimientos con mayores agregados de agua, la función llegó a un plateau al igual que lo reportado por Specht et al. (1986).

Se encontró que el cultivo de soja tuvo una productividad del agua de 8,5 kg mm<sup>-1</sup>, similar a 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 si en cantidad de agua.

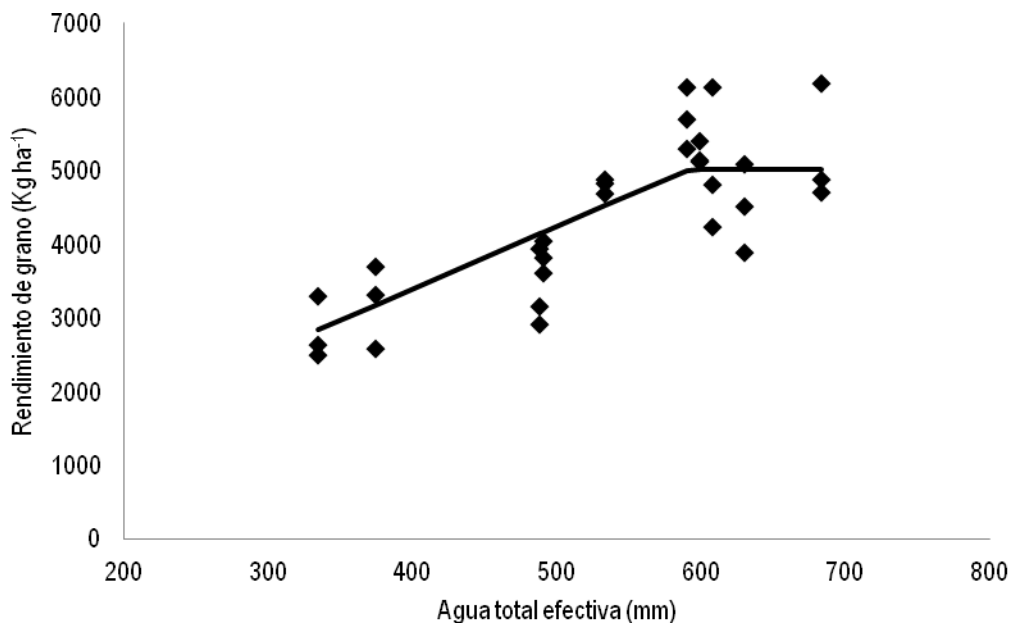


Figura 4. Rendimiento en función del agua total efectiva para los dos sitios evaluados. La línea continua representa un modelo lineal plus plateau: para  $x < NC$   $y = a + bx$ ; para  $x > NC$   $y = \text{plateau}$ .

Productividad del agua ( $\text{kg mm}^{-1}$ )	8,47
Máximo rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	5006
mm de agua total efectiva	590
$R^2$	0,68

Cuadro 2. Función de respuesta del rendimiento respecto al agua total efectiva.

Quando 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  $675 \text{ kg ha}^{-1}$ . 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 respecto al 100 %.

Tanto el tratamiento 50/100 como el 75 % encontraron 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. 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 R<sub>4</sub> y 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 relacionado a la diferencia en rendimientos ya que no hubo diferencia entre los tratamientos. No tuvo diferencias entre tratamientos, coincidiendo con los resultados encontrados por De Souza et al. (1997) y se mantuvo cercano a 200 g.

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 al menos hasta 40 cm, sin embargo las deficiencias hídricas estimularon al cultivo hacia una extracción de agua a mayor profundidad evidenciándose extracciones de agua hasta al menos 1 m de profundidad.

## **Conclusiones**

La respuesta del rendimiento en función del agua total efectiva se comportó como una función lineal 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<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>. Se podría utilizar la estrategia de riego deficitario controlado, de riegos con 50 % de la ET<sub>c</sub> hasta el estado fenológico R<sub>4</sub>, utilizando menor cantidad de agua sin repercusiones en el rendimiento, siempre que los requerimientos hídricos del cultivo sean cubiertos durante el período crítico, desde R<sub>4</sub> hasta R<sub>7</sub> 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 siguiendo el protocolo y cálculos descritos en la Guía FAO N°56, según Allen et al. (2006) tendría una precisión y exactitud, aceptables.

### **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, Franco J.** 1988. Estimaciones de las necesidades de riego en Uruguay : I. Magnitud y Frecuencia de la Lámina Neta Total. MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca), DGRNR (Dirección General de Recursos Naturales Renovables), DUMA (División Uso y Manejo del Agua). Montevideo, Uruguay. 110 p.

**Allen R, Pereira L, Raes D, 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. 298 p.

**Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M.** 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO. Irrigation and Drainage Paper N° 56. 300 p.

**Andersen, J, Alagarswamy, G, Rotz, C, Ritchie, J, LeBaron, A.** 2001. Weather impacts on maize, soybean and alfalfa production in the great lakes region. *Agronomy Journal*, V. 93, p. 1059-1070.

**Andriani J,** 2006. Dinámica del agua en el cultivo de soja. Soja: actualización técnica. (INTA) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Marcos Juárez, Marcos Juárez, Argentina: INTA. Vol. 3. 50 p.

- Andriani J, Andrade F, Suero E, 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, Terra R.** 2010. El riego en un clima cambiante. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo: INIA. pp. 7 - 18.
- Castaño J, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R.** 2011. Caracterización Agroclimática del Uruguay–1980-2009. Serie Técnica N°. 193. Montevideo: INIA. 134 p.
- Ceretta S, Saldain N.** 2005. Soja: Fecha de siembra x grupo de madurez. En: Jornada técnica de cultivos de verano. Serie Actividades de Difusión N° 417. Montevideo: INIA. pp. 21-24.
- Chalmers D, Mitchell P, 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, Bruening W.** 1997. Water stress during filling and leaf senescence in soybean. *Agronomy Journal*, 89: 807 - 812.
- DIEA (Dirección Nacional de Estadísticas Agropecuarias).** 2015. Producción Vegetal. En: Anuario Estadístico Agropecuario. [En línea]. 2015. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 215p. Consultado 22 marzo 2016. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2015,O,es,0>.
- Doorenbos J, Kassam A.** 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO. Estudio de Riego y Drenaje N° 33. 211 p.
- English M.** 1990. Deficit Irrigation. I: Analytical Framework. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 116: 399 - 412.
- Fassio A , Ibáñez W, Rodríguez M, Ceretta S, Pérez O; Rabaza, Vergara G, Restaino E.** 2013. Modelo de predicción fenológica para el cultivo de soja (FENOSoja). Disponible en: <http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Alertas-y-herramientas/Utilidades#> Verificado el 30 junio de 2016.
- Fehr W, Caviness C.** 1977. Stages of soybean development. Iowa State University of science and technology Cooperative Extension Service. Special Report. (En línea). Iowa, 80: 11 p. Verificado el 22 marzo 2016. Disponible en:

[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR\\_000g50w2l4s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR_000g50w2l4s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf).

**Fehr W, Caviness C, Burmood D, Pennington J.** 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, 2: 929 - 932.

**Fereres E, Soriano M.** 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58: 147 - 159.

**García M, Puppo L, Hayashi R, Morales P.** 2012. Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. [En línea]. 10p. Verificado el 22 marzo 2016. Disponible en: <http://www.grupodesarrolloriego.uy/pdf/2-seminario-2012/Metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo-a-campo.pdf>

**Giménez L.** 2012. Cuanto estamos perdiendo por no regar los cultivos en Uruguay? En: Seminario Internacional (2°, 2010, Salto, Uruguay). Riego en Cultivos y Pasturas. Montevideo: INIA. pp. 33-41.

**Giménez L, García M.** 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15: 100 - 108.

**Haverkamp R, Vauclin M, 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 : january-april 1973. N° 2936. Paris, Francia: UNESCO. 140 p.

**Kadhem F, Specht J, 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, Rouphael 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, 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.** 1956. Sample retainers for measuring water retention by soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 20(3): 301 - 303.

**Richards L.** 1948. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*, 68: 95 - 112.



- Salvagiotti F.** 2014. Bases para el manejo nutricional en maíz y soja de alto rendimiento. En: Seminario Internacional (3°, 2010, Paysandú, Uruguay). Riego en Cultivos y Pasturas. Montevideo: INIA. pp. 37-41.
- Sawchik J, 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. Montevideo: INIA. Serie Actividades de Difusión N° 417. pp. 41-45.
- Silva A, Ponce de Leon J, García F, Duran A.** 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. Boletín de Investigación N° 10. 20 p.
- Specht J, Williams J, 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, Specht J.** 2015. Soybean Irrigation Management: Agronomic impacts of deferred, deficit and full-season strategies. *Crop Science*, 54: 2782 - 2795.
- Wani S, Heng L, Vajja N.** 2012. Soybean. En: Steduto P, Hsiao T, Fereres E. Raes. (Eds.). *Crop yield response to water*. Rome: FAO. Irrigation and drainage paper N° 66. pp. 124 – 131.