

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFECTOS DE DIFERENTES DISPONIBILIDADES HÍDRICAS EN DISTINTAS
ETAPAS FISIOLÓGICAS DE SOJA SOBRE EL RENDIMIENTO

por

Paula FOSTER
Federico ROVEGNO

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2015

Tesis aprobada por:

Director:

.....
Ing. Agr. Luis Giménez

.....
Ing. Agr. Lucía Puppo

.....
Ing. Agr. Raquel Hayashi

Fecha: 04 de junio de 2015

Autor:

.....
Paula Elizabeth Foster Aranda

.....
Federico Conrado Rovegno Arbiza

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a las personas que hicieron posible este trabajo, a Luis por darnos la oportunidad de hacer esta tesis, a Richard, Gastón, Facu, Vitto, Coco, Mauri y Alvarito por compartir con nosotros el verano y ayudarnos con el trabajo de campo.

Gracias al resto de compañeros y amigos que me acompañaron en estos años de facultad, especialmente a la generación 2013 de la EEMAC de donde me llevo grandes amigos.

Gracias a toda la gente que me ha apoyado en estos años, especialmente a mi familia que sin su apoyo hubiera sido imposible lograr este sueño. Gracias por estar siempre y ser un sostén fundamental para mí en los momentos difíciles, por no dejarme bajar los brazos y estar incondicionalmente.

Paula

A nuestro tutor de tesis Ing. Agr. MSc. Luis Giménez por permitirnos desarrollar este trabajo, por su constante apoyo durante el mismo y a la Lic. Sully Toledo y todo el personal de biblioteca por su colaboración durante la realización del presente trabajo.

A Richard Arévalos, Gastón Canosa, Alvaro Espínola, Santiago Alcorta, Facundo Pessano, Vittorio Praderio y Mauricio Bustamante por su colaboración y disposición en el trabajo de campo, y su colaboración en materiales. Y a los funcionarios del laboratorio de la EEMAC.

Especialmente a mi familia y mis amigos de siempre junto a sus familias, por el constante apoyo y por estar siempre tanto en las buenas como en las malas, gracias a ellos esto es posible.

A todos aquellos compañeros y amigos que conocimos a lo largo de la carrera, quienes quedan en nuestro recuerdo, junto a todas las experiencias vividas. Especialmente a la generación EEMAC 2013.

Fede

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY	3
2.2. CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DE LA SOJA	3
2.3. PRINCIPALES REQUERIMIENTOS AMBIENTALES PARA EL CULTIVO DE SOJA.....	6
2.3.1. <u>Exigencias climáticas</u>	6
2.3.1.1. Temperatura.....	6
2.3.1.2. Fotoperíodo.....	7
2.4. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA	8
2.4.1. <u>Producción de materia seca</u>	8
2.4.2. <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u>	9
2.4.3. <u>Deficiencias hídricas</u>	10
2.5. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA.....	14
2.5.1. <u>Exigencias hídricas y consumo de agua por el cultivo</u>	16
2.5.2. <u>Eficiencia de uso del agua</u>	17
2.6. RIEGO	18
2.6.1. <u>Manejo del agua de riego</u>	18
2.6.2. <u>Respuesta al riego suplementario</u>	20
2.6.3. <u>Riego deficitario</u>	23
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	25
3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	25
3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	25
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	26

6. <u>RESUMEN</u>	52
7. <u>SUMMARY</u>	53
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	53

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo.....	25
2. Calendario de eventos fenológicos.....	26
3. Componentes del rendimiento para las diferentes estrategias de riego.....	43
4. Relación entre el rendimiento en grano y el número de granos por metro cuadrado y la radiación solar incidente en diferentes ensayos de soja a nivel nacional en tratamientos con bienestar hídrico durante el ciclo.....	45
5. Resultados comparativos entre años para una misma localidad.....	48
Figura No.	
1. Precipitaciones ocurridas durante 2013-2014	31
2. Radiación solar (Mj m ⁻² día ⁻¹) ocurrida durante el año Agrícola 2013-14 y valores promedio de la serie histórica 2002-12.....	32
3. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T2 (deficiencias hídricas en Periodo crítico) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).....	33
4. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T3 (deficiencias hídricas en floración) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).....	34
5. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T2 (deficiencias hídricas en el periodo crítico) y en el T3 (deficiencias hídricas en floración) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).....	35
6. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T4 (riego deficitario controlado) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras	

indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).....	35
7. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T5 (secano) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).....	36
8. Materia seca (kg ha^{-1}) depositada a inicio del periodo crítico (R4) en los diferentes tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).....	37
9. Materia seca (kg ha^{-1}) al fin del periodo crítico (R6) en los diferentes tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).....	38
10. Tasa de crecimiento del cultivo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) de los diferentes tratamientos durante el periodo crítico. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).....	40
11. Rendimiento en grano (kg ha^{-1}) para los tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey)....	41
12. Relación entre el rendimiento obtenido kg ha^{-1} y el número de granos por m^2	42
13. Relación entre el rendimiento obtenido kg ha^{-1} y el peso de mil granos (g).....	43
14. Número de vainas por planta en los diferentes tratamientos. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey)....	45
15. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ETc) diaria (mm día^{-1}) según década post-emergencia.....	46
16. Relación entre número de granos por m^2 y milímetros recibidos (PP total y riego) por cada tratamiento. Puntos con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey).....	49

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en Uruguay en la última década se ha intensificado y expandido. La superficie afectada a la producción de cultivos anuales creció continuamente, lo que resulta de dos procesos: intensificación en el área agrícola tradicional (litoral oeste) y expansión hacia nuevas zonas (Ernst y Siri-Prieto, 2011). Este crecimiento de la superficie de cultivos fue permitido gracias a la incorporación de cambios tecnológicos importantes, fundamentalmente en los cultivos de verano, tales como la adopción masiva de la siembra directa, la utilización generalizada de materiales genéticamente modificados, la incorporación de nuevas moléculas en los defensivos agrícolas y la modernización del parque de maquinaria utilizado (Giménez, 2012).

El área de siembra de la soja aumentó de 12.000 ha en la zafra 2000-01 a más de 1.321 mil ha en el año agrícola 2013-14, por lo que existe un incremento de 110 veces en la superficie de siembra (MGAP. DIEA, 2014). Esto originó un aumento significativo en la producción, no obstante los rendimientos presentan un estancamiento y una elevada variabilidad entre años, debido principalmente a la insuficiente y variable disponibilidad hídrica (García, 2009). La misma puede ser explicada por la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos en relación a las necesidades de los cultivos, conjuntamente con la variabilidad del régimen de lluvias, estos factores provocan que las deficiencias hídricas más o menos prolongadas sean un fenómeno corriente. A esta situación se suma un gradual aumento de la frecuencia de eventos extremos tanto por la incidencia del cambio climático global, como por la identificación de una mayor variación en las precipitaciones, los cuales generan deficiencias hídricas severas y comprometen seriamente la producción, incrementando los costos económicos de las medidas de mitigación e impactando fuertemente en aspectos productivos, económicos y sociales (Giménez et al., 2010).

El desarrollo del riego suplementario es una alternativa en los sistemas de producción agrícolas para incrementar los rendimientos y disminuir su variabilidad, sin embargo para mejorar la adopción de esta tecnología es preciso generar mayor información de manera de lograr superar los costos e inversiones que implica y además realizar un uso eficiente del agua de riego (Grasso y Montero, 2011). En ese entendido, conocer la respuesta productiva de los cultivos de verano a diferentes disponibilidades hídricas es un aspecto relevante para poder definir las estrategias de manejo del agua de riego más adecuadas a las condiciones del país (Giménez, 2012).

El riego deficitario controlado es una alternativa basada en una menor utilización de volúmenes de agua de riego, para mejorar la utilización del uso de agua por el cultivo y aumentar así la eficiencia de la gestión agrícola. La información sobre manejo del agua de riego suplementario en diferentes etapas fisiológicas de la soja y de riego deficitario controlado es escasa. Por estas razones se realiza el siguiente trabajo

con el objetivo de evaluar la respuesta productiva de la soja a diferentes estrategias de riego deficitario frente al riego durante todo el ciclo y en condiciones de secano.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN URUGUAY

La superficie total sembrada con cultivos de verano en 2013-14 fue estimada en 1.528 mil hectáreas. La soja con 1.321 mil hectáreas sembradas, aportó el 86 % del área de verano y su producción fue estimada en casi 3,2 millones de toneladas, siendo la mayor cosecha obtenida hasta el momento (MGAP. DIEA, 2014).

En la zafra 2013-14 el rendimiento medio del cultivo a nivel nacional fue estimado en 2.393 kg ha⁻¹ sembrada, lo que implicó una disminución del orden del 9 % respecto al rendimiento promedio de la zafra anterior (2012-13) que se mantiene como máximo histórico con 2.634 kg ha⁻¹. De todas formas, dicho rendimiento se encuentra en el orden del 15 % por encima del promedio nacional de los últimos 10 años (MGAP. DIEA, 2014).

El Uruguay presenta un clima templado y húmedo, sin embargo el potencial físico y económico de los sistemas de producción agrícolas es altamente dependiente del comportamiento de las precipitaciones ya que la mayor parte de los cultivos de verano se realizan en secano. Durante el verano, el contenido de agua disponible de los suelos, en general, no satisface la demanda hídrica de los cultivos (Giménez et al., 2010).

La precipitación media estacional del verano 2013-14 calculada a partir de las estaciones meteorológicas fue del orden de los 361 mm, variando entre 453 mm en la estación meteorológica de Artigas y 245 mm en la estación meteorológica de Punta del Este en Maldonado. El total medio máximo para el país correspondió al verano de 2009-10 con 684 mm y el medio mínimo en el verano 1978-79 con 155 mm (MDN. DNM, 2014).

2.2. CARACTERÍSTICAS FENOLÓGICAS DE LA SOJA

La metodología de descripción de los estadios de desarrollo propuesto por Fehr y Caviness (1977), es la más utilizada a nivel mundial. El sistema de clasificación divide los estadios de desarrollo de soja en estadios vegetativos y estadios reproductivos. Los estadios vegetativos son designados con la letra V y los reproductivos con la letra R. Con excepción de los estadios VE (emergencia) y VC (cotiledonar), las letras V y R son seguidas de índices numéricos que identifican estadios específicos, en esas dos fases de desarrollo de la planta.

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

Según Kantolic et al. (2003a), la fase germinación-emergencia es una de las más críticas. Aun cuando las condiciones térmicas sean favorables, la humedad del suelo resulta clave en definir el establecimiento de las plántulas, a través de su efecto directo sobre la imbibición y el crecimiento de las plántulas e indirectamente, a través de sus interacciones con el oxígeno del suelo, la temperatura, la profundidad de siembra o el estado de la superficie del suelo.

Para la determinación de los estadios vegetativos (V1 a Vn) los nudos cotiledonares no son considerados, porque no poseen hojas verdaderas. Los nudos por encima de los cotiledonares corresponden a las hojas unifoliadas, como ambas hojas se disponen de forma opuesta son consideradas como un nudo. Todos los nudos por encima de las unifoliadas son alternos, ocupan diferentes posiciones en el tallo y presentan una hoja trifoliada. Una hoja se considera completamente expandida cuando está totalmente abierta y los bordes de la hoja inmediatamente superior ya no se tocan. Vn corresponde al número de nudos con hojas completamente expandidas por encima del nudo cotiledonar (Neumaier et al., 2000).

Tanto en el tallo principal como en las ramificaciones, la expansión de las hojas prosigue durante gran parte de los periodos de floración y fructificación, originando una superposición entre las apariciones de hojas y la aparición de órganos reproductivos. El número de nudos que se elongan y se hace visibles luego de la floración depende del hábito de crecimiento pero puede ser fuertemente modificado por factores ambientales (Kantolic et al., 2003a). El mismo autor asegura que el hábito o tipo de crecimiento es un atributo genético que define la forma de terminación del tallo.

En forma simultánea al crecimiento de la parte aérea, las raíces crecen y profundizan. El sistema radical está constituido por una raíz principal y un gran número de raíces secundarias que soportan varios órdenes de raíces pequeñas. Las raíces principales pueden alcanzar una profundidad de 200 cm y las laterales de 250 cm pero, casi siempre, el sistema radical es menos profundo dado por las condiciones de competencia entre plantas. En general, un 80 % del peso seco y más del 40 % de la superficie de las raíces se encuentra concentrado en los primeros 15 cm del suelo. El mismo autor asegura que el crecimiento de las ramificaciones generalmente es máximo a partir de floración (Lersten y Carlson, 2004).

Kantolic et al. (2003a), indican que los estados reproductivos están basados en la floración, el desarrollo de las vainas, el desarrollo de las semillas y la maduración y en la mayoría de ellos se considera el estado de los nudos superiores del tallo principal, independientemente de los órganos presentes en otras posiciones de la planta.

Asimismo, Farias et al. (2007), mencionan que los estadios reproductivos son denominados por la letra R seguida por un número del 1 al 8 que describen el periodo floración-madurez. Los estadios reproductivos abarcan cuatro distintas fases de

desarrollo reproductivo de la planta, ellos son floración (R1 y R2), crecimiento de vainas (R3 y R4), crecimiento de granos (R5 y R6) y maduración de la planta (R7 y R8).

La fase de floración puede durar varias semanas y en un mismo momento (e incluso en un mismo nudo) pueden encontrar flores recientemente abiertas, flores ya marchitas y vainas en crecimiento (Kantolic et al., 2003a).

Luego de la fecundación, que ocurre generalmente el mismo día o el anterior a la apertura de la flor, comienza el desarrollo de la vaina. La longitud y el ancho máximo de la vaina se alcanzan pocos días después de floración y en este momento las semillas solo tienen un 4 % de su peso máximo; el peso de las vainas continuará incrementándose durante parte del crecimiento de los granos (Kantolic et al., 2003a).

Una vez que las vainas han alcanzado su máxima longitud comienza a hacerse evidente el crecimiento de los granos. A lo largo del período de llenado los granos aumentan de tamaño, ocupando progresivamente cada lóculo de la vaina. En el estado R6, en las vainas de los nudos superiores los granos tienen un diámetro igual al de la cavidad de la vaina; las vainas maximizan su peso seco mientras que resta menos de un 20 % del crecimiento de los granos (Kantolic et al., 2003a).

Según Kantolic et al. (2003a), entre los estados R5 y R6 se alcanzan los valores máximos de altura, número de nudos y área foliar. A medida que progresa el llenado comienza un creciente amarillamiento de las hojas, que avanza desde las hojas más viejas de los nudos inferiores hacia las hojas más jóvenes en los estratos superiores del canopeo.

La madurez fisiológica se alcanza cuando cesa la acumulación de materia seca en el grano. El signo más evidente de que se ha alcanzado este estado es que la semilla y, generalmente, también la vaina, pierde su color verde y adquiere el color típico marrón pajizo. No todas las vainas alcanzan la madurez al mismo tiempo; según condiciones ambientales y genotípicas, entre 5 y 10 días después de observada la primera vaina madura, se alcanza la madurez en toda la planta (estado R8) (Kantolic et al., 2003a).

Según Kantolic et al. (2003a), una semilla recién formada contiene un 90 % de humedad. A medida que se acumula materia seca en el grano y aumenta el tamaño de la semilla, el porcentaje de agua disminuye a una tasa constante hasta alcanzar un 60 % de agua cuando se alcanzó el 90 % del tamaño de la semilla. En el momento de madurez fisiológica las semillas tienen cerca de un 55 % de agua y luego el contenido de humedad declina rápidamente al 10-15 %.

2.3. PRINCIPALES REQUERIMIENTOS AMBIENTALES PARA EL CULTIVO DE SOJA

2.3.1. Exigencias climáticas

Los elementos climáticos más importantes que determinan el desempeño en rendimiento de la soja son la temperatura, el fotoperíodo y la disponibilidad hídrica (Farias et al., 2007).

La temperatura y el fotoperíodo regulan la duración de las fases de desarrollo de la soja (Kantolic et al., 2003a). Ambos factores actúan simultáneamente y hay algunas evidencias de que existen interacciones entre ellos (Sinclair et al., Summerfield et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

2.3.1.1. Temperatura

La temperatura regula el desarrollo a lo largo de todo el ciclo, pero los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren a lo largo de las fases de desarrollo (Kantolic et al., 2003a). La duración de las etapas fenológicas de soja se expresa en $^{\circ}\text{C día}^{-1}$. La temperatura tiene marcados efectos sobre la tasa de desarrollo durante la fase vegetativa (Sadras et al., 2000).

La temperatura base para la fase germinación-emergencia esta comprendía entre 6 y 9 $^{\circ}\text{C}$ presentando un rango óptimo de temperaturas entre 25 y 30 $^{\circ}\text{C}$, temperaturas superiores a la óptima enlentecen el crecimiento hasta detenerlo por encima 40 $^{\circ}\text{C}$ (Kantolic et al., 2003a). Los mismos autores menciona que a lo largo del ciclo, la temperatura base tiende a disminuir y también se modifica el rango de temperaturas óptimas.

Kantolic et al. (2003a), indican que el tiempo térmico requerido para que se acumule la fase siembra-emergencia se ha estimado entre 120 y 200 $^{\circ}\text{C día}^{-1}$ ($T_b = 6^{\circ}\text{C}$), para condiciones de buena y regular provisión hídrica, respectivamente.

Bote et al., citados por Kantolic et al. (2003a), proponen un modelo que se define por una función lineal tri-segmentada en el que se observan la temperaturas bases (tb), temperaturas óptimas inferior y superior que definen un rango óptimo (to), y temperaturas máximas (tm), para los períodos VE-R1, R1-R5, R5-R7. Las temperaturas óptimas para estos períodos son 27-37 $^{\circ}\text{C}$, 23-27 $^{\circ}\text{C}$, y 23-36 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

De la misma forma, Farias et al. (2007), indicaron que la soja presenta mayor adaptación a regiones con temperaturas entre 20-30 $^{\circ}\text{C}$, regiones con temperaturas inferiores a 10 $^{\circ}\text{C}$ no son recomendables para el cultivo, así como tampoco temperaturas por encima de 40 $^{\circ}\text{C}$, ya que las mismas tienen un efecto negativo sobre la tasa de crecimiento, provocan daños en la floración y disminuyen la capacidad de retención de vainas. Todos estos efectos se ven acentuados cuando ocurren deficiencias hídricas.

En sus investigaciones Farias et al. (2007), sostienen que las diferencias en la fecha de floración entre años, para un mismo cultivar sembrado en la misma época están dadas por las variaciones de temperatura. Así, la soja florece en menor tiempo cuando las temperaturas son elevadas, lo que puede tener como consecuencia una disminución en el tamaño de planta. Este problema puede ser mayor si al mismo tiempo ocurren deficiencias hídricas y/o fotoperiódicas durante el periodo de crecimiento. Las diferencias en la fecha de floración de diferentes cultivares, con una misma época de siembra, en un mismo lugar, están dadas, principalmente, por la respuesta diferencial de los cultivares al fotoperíodo.

Si bien no se ha encontrado gran variabilidad entre los genotipos en cuanto a la respuesta a la temperatura (en lo que se refiere a temperaturas base, óptimas y máximas). Si se sabe que los requerimientos en días fototermales para que se cumpla la etapa emergencia-floración, tienden a disminuir a medida que el grupo de madurez (GM) es menor (Piper et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

2.3.1.2. Fotoperíodo

La soja es una especie que se considera de día corto con respuesta cuantitativa (Garner y Allard, citados por Kantolic et al., 2003a), ya que el pasaje de estado vegetativo a reproductivo se acelera con el acortamiento de los días, variando según la sensibilidad del material genético.

Kantolic et al. (2003a), indican que el fotoperíodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos como la iniciación floral, la fructificación y el llenado de granos, condicionando el momento que comienzan y finalizan las diferentes fases y las tasas con que se desarrollan.

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

A medida que avanza el ciclo la sensibilidad al fotoperíodo tiende a aumentar (Grimm et al., citados por Kantolic et al., 2003a).

Tanto el valor del fotoperíodo crítico, como la sensibilidad fotoperiódica presentan una considerable variabilidad genotípica. Los GM inferiores presentan umbrales elevados y baja sensibilidad, a medida que aumenta el GM disminuye el umbral y aumenta la sensibilidad, acentuándose en post-floración (Kantolic et al., 2003a).

De la misma forma, Hadley et al., citados por Giménez y García (2011), mencionan que en la soja la duración del ciclo está controlada por la acumulación térmica y por el fotoperíodo, la sensibilidad a cada factor depende del GM. Los GMs cortos, como el IV, presentan baja sensibilidad al fotoperíodo, la acumulación de temperaturas es el factor de mayor importancia en la inducción floral y por ende en la duración del ciclo. Los mismos autores mencionan que en soja de GM VI (GMs intermedios a largos), la duración del ciclo está afectada fundamentalmente por el fotoperíodo.

2.4. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA

2.4.1. Producción de materia seca

En ausencia de limitantes en la disponibilidad de agua y nutrientes, el cultivo de soja debe desarrollar un canopeo que permita maximizar la intercepción de radiación solar (RS) durante la etapa reproductiva temprana (Salvagiotti, 2009).

Andrade y Sadras (2000b), aseguran que para lograr altas producciones de biomasa en el cultivo se necesitan elevadas radiaciones y temperaturas diurnas óptimas para el proceso fotosintético que posibilitan altas tasas de crecimiento y prolongadas duraciones de las etapas fenológicas.

Según Mondino y Gómez (2006), la mayor acumulación de materia seca (MS) vegetativa se produce poco después de R5.5 mientras que los valores máximos de MS reproductiva se alcanzan al comienzo de R7, momento en que también se obtienen los mayores valores de MS total. Shibles et al., citados por Mondino y Gómez (2006), proponen una alta producción de MS en estados vegetativos antes de ingresar en el período reproductivo, ya que el rendimiento es función directa de la producción de biomasa.

En evaluaciones realizadas por Giménez (2014), en los años 2009-10 y 2010-11, efectuadas en soja bajo riego, donde se lograron producciones de 8347 kg ha⁻¹ de MS al estadio R6 en el primer año y en el segundo se lograron una producción máxima de 16168 kg ha⁻¹ de MS a R6, el autor argumenta las diferencias encontradas entre años por la reducción de RS incidente a causa de excesos de PP en el primer año del experimento, en cambio en el segundo año las condiciones climáticas fueron diferentes con menores PP y alta RS incidente.

Asimismo, Andrade et al. (2000a) en ensayos conducidos en soja bajo riego obtuvieron una producción aproximada a 12000 kg ha⁻¹ de MS aérea.

Giménez (2014), en evaluaciones de diferentes cultivares obtuvo acumulaciones de MS a R5 de 18252 kg ha⁻¹.

En ensayos realizados por Mondino y Gómez (2006), en la estación experimental de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias de la Universidad Nacional de Santiago del Estero en los años 2002-03 y 2003-04, en soja bajo riego, los máximos volúmenes de producción de MS se registraron en R7 con un promedio de 10500, 11900 y 14600 kg ha⁻¹ para los distanciamientos entre hilera de 0,70; 0,50 y 0,35 m, respectivamente.

En experimentos en secano realizados por Buyatti et al. (2006), con diferentes fechas de siembra en soja, se lograron producciones en el estadio R6 entre 5800 kg ha⁻¹ y 2500 kg ha⁻¹ de MS.

Según Andrade y Sadras (2000b), la disminución de la producción de biomasa en los cultivos sometidos a estrés hídrico puede deberse a una reducción en la interceptación de radiación (como consecuencia de una menor tasa de expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar) y/o una disminución en la eficiencia de conversión de radiación interceptada como consecuencia de una caída de la tasa fotosintética por unidad de área foliar.

2.4.2. Tasa de crecimiento del cultivo

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es el índice más significativo para caracterizar el incremento del canopeo e indica la acumulación de MS por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Radford, citado por Mondino y Gómez, 2006).

Quijano et al., citados por Bordero (2003), indican que el componente más asociado con variaciones en rendimiento de soja es el número de semillas por unidad de área de suelo el que a su vez es función de la TCC entre plena floración y comienzo de llenado de los granos.

Shibles et al. para EE.UU y Baigorri et al. en Argentina, citados por Mondino y Gómez (2006), mencionan que los valores de TCC durante la fase lineal del crecimiento oscilan entre 8,6 y 18,6 g m⁻² d⁻¹.

Andrade et al. (2000a), registraron valores de TCC medidas desde los 40 hasta los 80 días después de emergencia de $18 \pm 0,8$ g m⁻² d⁻¹.

Según Toledo (2013), la TCC está estrechamente relacionada a la interceptación de RS, la que a su vez depende del IAF.

La TCC aumenta a medida que aumenta el IAF hasta que alcanza un valor crítico capaz de interceptar el 95 % de la RS incidente, esto se conoce como IAF crítico y se encuentra entre 3,1 y 4,5 y depende de la estructura de la planta, que a su vez depende de la FS y el GM; la densidad de siembra y el espaciamiento entre surco son otras variables que influyen sobre la estructura (Toledo, 2013).

Toledo (2013), menciona que si el cultivo no logra alcanzar el IAF crítico, la primera consecuencia es su menor eficiencia en la captación de la radiación, esto lleva a una disminución de la TCC por lo tanto el rendimiento se reduce.

Según Frederick et al. (2001), los efectos negativos del déficit hídrico sobre la TCC solo tienen impacto en el rendimiento cuando la planta alcanza el estado reproductivo, coincidiendo con lo reportado por Johnson et al., Jiang y Egli, citados por Modali (2004).

Para lograr altos niveles de TCC en el período deseado se debe tener altos niveles de IAF, adecuada disponibilidad hídrica y radiación solar (Modali, 2004).

Board y Harville, citados por Modali (2004), indicaron que el rendimiento de la soja puede ser aumentado minimizando el estrés ambiental que enlentece la TCC entre emergencia y comienzo de llenado de granos (R5).

Kantolic (2003b), indica que para obtener altos rendimientos en soja la TCC se debe maximizar durante R1-R6, y en consecuencia también se maximizarán el número de nudos logrados por unidad de superficie y la supervivencia de vainas, y el cultivo contará con mayor cantidad de asimilados para sostener un correcto llenado de granos.

La soja puede alcanzar IAF muy altos, sin embargo la TCC no disminuye (Baigorri, citado por Toledo, 2013), lo que significa que las hojas sombreadas no son parásitas para la planta (Shibles et al., citados por Toledo, 2013).

2.4.3. Deficiencias hídricas

El estrés hídrico es considerado a nivel mundial como el factor más importante en limitar el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Boyer, citado por Giménez, 2014).

El agua es uno de los más importantes componentes de todos los organismos vivos y específicamente en las plantas, es el principal constituyente, ya que representa 80 % o más del peso de las plantas herbáceas. Además de ser una parte fundamental, constituye el medio de transporte de los nutrientes que provienen del suelo y en el proceso fotosintético el agua se combina con el dióxido de carbono para constituir la biomasa (Palacios Vélez, citado por Currié et al., 2006).

El consumo mayor del agua no es en la formación de los tejidos vegetales, sino en el proceso de transpiración. Se estima que en la mayoría de los cultivos el agua evapotranspirada durante su desarrollo representa más del 95 % del consumo de este elemento (Palacios Vélez, citado por Currié et al., 2006).

Los cultivos pueden manifestar deficiencias hídricas, en especial a las horas de máxima demanda atmosférica, cuando la absorción de agua por las raíces es insuficiente

para compensar las pérdidas por transpiración. Si este desbalance es muy pronunciado y/o se prolonga en el tiempo, genera en el cultivo una situación de estrés hídrico que afecta su normal funcionamiento (Dardanelli et al., citados por Currié et al., 2006).

Asimismo, García y Ferrarotto (2009), aseguran que la demanda atmosférica es un factor de gran importancia ya que determina la cantidad de agua que requiere el cultivo de soja para su máxima producción; la misma dependerá de la radiación incidente, de la temperatura, de la humedad relativa del aire y del viento. Al aumentar, la planta de soja evapotranspira una mayor cantidad de agua, hasta un cierto límite fijado por el potencial de agua de sus hojas.

Cualquier cultivo de soja debe disponer diariamente de agua para satisfacer la demanda atmosférica, es decir, su consumo diario. El suelo es el único reservorio de agua que dispone la planta; el volumen de suelo explorado por las raíces es el que determina la cantidad de agua potencialmente disponible para el cultivo (García y Ferrarotto, 2009).

La capacidad de las raíces para extraer agua del suelo depende de la distribución y profundidad del sistema radical. Desde el punto de vista del balance de agua, es muy importante conocer el crecimiento de las raíces en profundidad. A medida que la raíz profundiza va aumentando el volumen de suelo explorado, donde puede estar almacenada el agua. Las plantas de soja poseen una raíz principal muy desarrollada y engrosada en sus primeros centímetros y raíces secundarias más delgadas pero con una gran capacidad de profundización. Las raíces de los principales cultivos extensivos tienen una gran capacidad exploratoria a través de todo el perfil de suelo, aunque la mayor densidad se encuentre en los primeros centímetros (García y Ferrarotto, 2009).

García y Ferrarotto (2009), concluyen que el déficit hídrico produce un incremento en la longitud del sistema radicular de las plantas pero con una menor superficie ocupada.

García y Ferrarotto (2009), aseguran que se ha establecido que sólo el 50 % de la cantidad máxima disponible de agua en el suelo es fácilmente extractable. El 50 % restante es utilizado por la planta bajo condiciones de estrés hídrico, cada vez más intenso a medida que disminuye su contenido. Por lo tanto, el límite de estrés hídrico está fijado en el 50 % del contenido de agua útil del suelo explorado por las raíces.

El estrés hídrico en etapas vegetativas afecta la expansión foliar reduciendo el índice de área foliar y la radiación incidente interceptada (Dardanelli et al., 2003).

El déficit hídrico suele provocar pérdida de turgencia, que resulta en una disminución de la tasa de crecimiento y da como resultado un menor tamaño final de los órganos que se encuentran en expansión activa en el momento del estrés. En los cultivos

estos efectos se aprecian a escala productiva, lo cual implica la consideración de los órganos de cosecha al definir períodos susceptibles (Dardanelli et al., 2003).

El flujo transpiratorio está directamente relacionado con la fijación de CO₂ ya que la RS es la fuente de energía para ambos procesos y los flujos de ambos gases tienen resistencias en común, por consiguiente, bajo condiciones favorables para la absorción de agua, cuanto más energía absorbe un canopeo, más agua puede transpirar y más CO₂ puede fijar (Dardanelli et al., 2003).

El rendimiento en granos está estrechamente asociado con la transpiración y fijación del CO₂, es importante que el cultivo pueda capturar la mayor parte posible del recurso agua, utilizar el recurso capturado lo más eficientemente posible al intercambiarlo a nivel de estomas por el CO₂ destinado a producir fotoasimilados y convertir la mayor parte posible de los asimilados a órganos de cosecha (Dardanelli et al., 2003). Es así como el estrés hídrico afecta el rendimiento a través de la disminución en la acumulación de MS y por los efectos negativos sobre el crecimiento celular, la expansión foliar y la fijación biológica de N₂ (FBN) que es especialmente vulnerable a las deficiencias de agua (Sinclair y Serraj, Serraj et al., citados por Giménez, 2014).

De la misma forma, Santos (2009), asegura que el déficit hídrico afecta al crecimiento y rendimiento del cultivo de soja a través de su acción sobre la fotosíntesis (economía del carbono) y la FBN (economía del N₂). En verano, al acentuarse el déficit hídrico en el suelo con el paso de los días sin lluvia, la fijación biológica cae antes que las fotosíntesis.

Según Andrade y Sadras (2000b), el crecimiento es el resultado de la división y la expansión celular que se ve afectado por la ocurrencia de períodos de estrés hídrico mediante la reducción de la transpiración y la fotosíntesis. La caída de la tasa fotosintética, reduce la eficiencia de conversión de la radiación y la producción de granos.

Según Sionit y Kramer, citados por García y Ferrarotto (2009), afirman que el déficit hídrico afecta el crecimiento de la soja y la formación temprana de la vaina, causando reducciones significativas del número y peso de las semillas y hace más temprana la maduración de las vainas lo cual disminuye el rendimiento del grano por unidad de superficie hasta 50 %.

La etapa de desarrollo en la que ocurren las deficiencias es determinante del rendimiento, porque a una misma intensidad y duración de la deficiencia, el efecto será diferente (García y Ferrarotto, 2009).

En estudios realizados por Dardanelli et al. (1991), se sostienen que deficiencias de agua ocurridas durante la etapa reproductiva reducen significativamente

la acumulación de MS por el cultivo, en cambio el rendimiento en grano sólo se ve afectado cuando dichas deficiencias ocurren durante el periodo de llenado de grano.

Andriani (2002), concluyó que los déficit hídricos de mediana intensidad (40-50 % de agua útil en el suelo) provocados en el período de emergencia a floración (VE-R1) no producen reducciones en el rendimiento en la semilla, si bien pueden disminuir el área foliar y la altura de la planta. También menciona que intensidades mayores de déficit hídricos (20-40 % del agua útil en el suelo) podrían producir reducciones en el rendimiento en semillas en el orden del 10 %. Otra conclusión que extrae es en cuanto al déficit hídrico en el período de floración a comienzo del llenado de la semilla (R1-R5), éste período es más sensible al déficit hídrico que el anterior mencionado, ya que intensidades medias de déficit pueden producir reducciones en el rendimiento en semilla del orden del 10 % y deficiencias severas un 20 % o más. Esto se debe al aborto de flores y vainas que disminuyen el número final de estas últimas, siendo en parte compensado por el peso de las semillas, si cesan las deficiencias hídricas en la etapa siguiente. Señala también que deficiencias hídricas en la fase de comienzo a fin de llenado de semilla (R5-R7), el cual menciona que es el período más crítico para el cultivo de soja, produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de semillas por vaina y del peso de las semillas; y que deficiencias hídricas severas durante este período pueden producir pérdidas de rendimiento muy importantes del orden del 40 % o más.

En estudios realizados por Giménez (2014) se indica que las deficiencias hídricas impuestas en el PC (R4-R6) provocaron disminuciones significativas en el rendimiento de soja. Se cuantificaron pérdidas de grano que variaron entre 44 y 50 %. Las reducciones del rendimiento por deficiencias en las etapas no críticas (ENC) previas al PC fueron de 23 %. El estrés hídrico durante el PC provocó menor acumulación de MS afectando negativamente la TCC en dicha etapa y el principal componente del rendimiento, es decir el número de granos por m². En las ENC las deficiencias provocaron disminuciones en la acumulación de MS sin afectar significativamente el número de granos.

De la misma forma, Karam et al. (2005), sostienen que la reducción en el área foliar y la acumulación de MS se da principalmente cuando el estrés hídrico ocurre durante R2, sin embargo la menor variación en la acumulación de MS ocurre en R5 y R7 en comparación con R2, lo que está indicando que pueden existir compensaciones cuando ocurre estrés hídrico temprano. En situaciones de baja disponibilidad de agua hasta R2 no se encontraron diferencias significativas en cuanto al rendimiento debido a dichos mecanismos de comparación lo que podría hacer posible que en áreas donde hay baja disponibilidad de recursos hídricos se suprima el riego previo a esta etapa.

Cuando ocurre un estrés hídrico durante la etapa R5, se produce una pequeña disminución en el peso de los granos, también se da una disminución significativa del rendimiento que esta dado principalmente por la reducción en el número de vainas y de

granos por planta. El número de granos por superficie es el componente del rendimiento que es más sensible a un déficit hídrico durante la etapa de crecimiento de granos. Un estrés en R7 puede provocar disminución en el peso de los granos pero a una tasa menor de la que puede darse en R5, pero no provoca disminuciones en el número de vainas ni granos por planta (Karam et al., 2005).

Asimismo Fehr y Caviness (1977), aseguran que las etapas del ciclo de mayor sensibilidad a la ocurrencia de deficiencias hídricas son las comprendidas entre la fructificación avanzada y el llenado de granos, etapas entre R4 y R6, es decir el periodo más crítico de determinación del rendimiento. Esto se debe, a que durante estas etapas la capacidad de compensación del cultivo se ve reducida, debido a que al aborto floral por deficiencias hídricas se le agrega el de las vainas de menor tamaño, que son las estructuras reproductivas que presentan mayor susceptibilidad de abscisión (Giménez, 2014).

Deficiencias hídricas entre R4 y R5.5 afectan principalmente el número de granos por superficie y en estados posteriores disminuyen el peso de los granos (Andriani, 2002).

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

2.5. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

El consumo de agua de los cultivos es el valor de la evapotranspiración acumulada en todo su ciclo, depende de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo y del área foliar desarrollada por éste. Casi toda el agua transpirada por un cultivo pasa a través de la superficie de sus hojas, de tal manera que a medida que aumenta el área foliar, aumenta linealmente el consumo de agua del cultivo para una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el cultivo el 95 % de la radiación fotosintéticamente activa. Esto coincidiría con un área foliar de 4 aproximadamente, según cultivar. A partir de ese valor por más que se incremente el área foliar el consumo de agua por transpiración se estabiliza y la evaporación se hace mínima (Gerster y Bacigaluppo, 2009).

De la misma forma, Pereira y Alves, citados por Giménez y García (2011), indican que las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración (ET) que presentan en el ambiente en el que se desarrollan y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva.

Allen et al. (2006), indican que la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de RS que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el tapiz del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal de gasto de agua. En el momento de la siembra, casi el 100 % de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90 % de la ET ocurre como transpiración.

La demanda atmosférica es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). La principal fuerza motriz de la demanda es la cantidad de RS que alcanza la superficie terrestre (Otegui, 2009).

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ET_c, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (Allen et al., 2006).

Doorembos y Pruit, citados por Allen et al. (2006), sugieren que se puede obtener el requerimiento de agua de un cultivo o ET_c multiplicando el término que cuantifica las características del cultivo, denominado coeficiente del cultivo (K_c) por la ET_o. El valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del K_c entre distintas áreas geográficas y climas.

Otegui (2009), señala que el K_c adquiere valores cercanos o superiores a 1 durante las etapas de máxima cobertura del suelo. En la mayoría de las especies de interés, estas etapas suelen coincidir con los períodos más asociados a la determinación del rendimiento.

Karam et al. (2005), reportaron un valor de K_c de 0.62 en el estado V10, y después este aumenta a 0.84 a inicio de la vaina, para luego en vaina madura alcanzar un valor máximo de 1.0 indicando que en esta etapa ET_c es igual a la ET_o.

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_c aj) se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes de las condiciones estándar. Bajo condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET_c debido a condiciones no óptimas como son la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo y limitación o exceso de agua (Allen et al., 2006).

De la misma forma, Allen et al., citados por Giménez y García (2011), aseguran que en condiciones de campo la ET ajustada puede ser menor que la ETc debido a condiciones no óptimas y se suele llamar evapotranspiración real (ETr).

La ETr estima el consumo de agua de los cultivos que ocurre en las situaciones reales de campo en condiciones de secano. La misma se encuentra determinada principalmente por la demanda atmosférica, la ocurrencia de PP, la CAAD de los suelos y las características morfo-fisiológicas del cultivo (Giménez y García, 2011).

En estudios realizados por Giménez y García (2011), se determinó mediante el análisis de una serie de más de 20 años que la ETc estimada para el cultivo de soja fue superior a la ETr en la mayoría de las situaciones planteadas, estas diferencias representan las deficiencias hídricas del cultivo.

2.5.1. Exigencias hídricas y consumo de agua por el cultivo

Farias et al. (2007), aseguran que la disponibilidad hídrica durante el periodo de crecimiento de soja constituye la principal limitante para lograr el potencial de rendimiento siendo además la principal causa de las variaciones obtenidas entre años. La disponibilidad de agua es importante, principalmente en dos periodos de desarrollo de la soja; en la etapa germinación-emergencia y floración-llenado de grano. Durante el primer período, tanto el exceso como la falta de agua son perjudiciales para el establecimiento del cultivo y la obtención de una buena uniformidad en la población de plantas, siendo el exceso hídrico más perjudicial que el déficit. Las necesidades de agua del cultivo van aumentando con el desarrollo del cultivo, alcanzando el máximo durante floración-llenado de grano. La necesidad total de agua del cultivo de soja para la obtención de máximos rendimientos varía de 450-800 mm, dependiendo de las condiciones climáticas, el manejo del cultivo y la duración del ciclo.

Caraballo da Silva (1990), indicó que la semilla de soja requiere el 50 % de su peso en agua para germinar, lo cual la hace más exigente que la mayoría de los cultivos. El mismo autor indicó que en la etapa de plántula la demanda de agua es baja y el sistema radical es poco profundo, siendo las plantas totalmente dependientes de la humedad concentrada en los primeros centímetros de suelo, por lo cual una buena estrategia será humedecer solamente los primeros 20-30 cm de suelo. La etapa de rápido crecimiento vegetativo se refiere al período en que las plantas desarrollan activamente su follaje y sus raíces; sin embargo, aún para el momento en que se inicia la floración, el sistema radical de la soja se encuentra en un 94 % en los primeros 25 cm de suelo. Demasiada humedad en esta etapa tiende a producir el volcamiento de las plantas y afectar el rendimiento.

Karam et al. (2005), sostienen que el 65 % de la ETc de soja ocurre durante la etapa de llenado de grano, y además es el momento de mayor sensibilidad a un estrés hídrico.

Molfino y Califra (2001), indican que la mayoría de los suelos sobre los que se realiza agricultura en el país presentan una CAAD que varía entre 80 y 160 mm. Giménez y García (2011), concluyen que dada la escasa CAAD de los suelos, la elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos en secano, provienen fundamentalmente de las PP.

Giménez y García (2011), destacaron que las ETc estimadas de soja para una serie amplia de años presentaron variabilidad en éstos, destacándose los años «Niña» y «Niño» con los mayores y los menores valores respectivamente. La respuesta estuvo asociada inversamente al comportamiento de las PP. El rango de variación de las ETc en las diferentes situaciones agroclimáticas planteadas fue de 455 a 836 mm y las ETc promedio variaron entre 463 y 641 mm. Las estimaciones de las ETr fueron sustancialmente menores que las ETc en la mayoría de las situaciones agro-climáticas planteadas y con una variabilidad entre años superior. Asimismo, se destacan los años «Niña» y «Niño» con los menores y mayores valores de ETr respectivamente.

Della Maggiora et al. (2000), evaluaron la evolución de la ETc en maíz, girasol y soja, encontrando que la soja presentó mayores valores de ETc, durante etapas iniciales y menores cuando alcanzó su máximo desarrollo, debido a que se siembra más tarde que los otros cultivos y esto la expone a una demanda atmosférica mayor en etapas iniciales. La ETc mantuvo valores cercanos a la ETo, salvo en el período comprendido entre R1-R6 donde fueron más altos.

Este mismo comportamiento coincide con los presentados por Reicosky y Heatherly, citados por Della Maggiora et al. (2000), donde la ET se incrementó desde V3 hasta V6 y presentó los máximos valores entre R1 y R6. La media estacional fue de 4 mm día⁻¹ y los máximos valores fueron de 7,6 mm día⁻¹, presentando un ciclo de 117 días, con un consumo total de 454 mm.

El conocimiento de la máxima ETc durante las diferentes etapas de desarrollo del ciclo, es muy importante para el manejo del agua en agricultura bajo riego. La soja para lograr un buen desempeño necesita, además de un volumen de agua adecuado, una buena distribución de las lluvias a lo largo del ciclo, para cubrir las necesidades, principalmente, durante los periodos más críticos (Farias et al., 2007).

2.5.2. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia de uso del agua (EUA) es la relación entre la producción de granos (kg ha⁻¹) y el consumo de agua en milímetros (mm) necesarios para dicha producción (Toledo, 2013). En el caso de la soja se registran valores entre 5-6 kg ha⁻¹ mm⁻¹ y 11 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Della Maggiora et al., 2000), tomándose una EUA promedio de 8 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Toledo, 2013).

De la misma forma, Della Maggiora et al. (2000), indican que la EUA relaciona la producción de MS o rendimiento con la ET. La misma varía entre especies, debido a su tipo de metabolismo C3 o C4, composición de la biomasa, y a las características del uso del agua, variando también entre climas que condicionan la demanda atmosférica.

Se observan menores eficiencias de soja con respecto a otros cultivos de verano, ya que presenta una menor eficiencia fotosintética y además un alto contenido energético del grano (Andrade et al., 2000a).

Debido a la dependencia de la EUA de la condición climática y del manejo del cultivo, existe un amplio rango que detalla la bibliografía de EUA para cultivos con adecuada disponibilidad de agua. Así, los valores máximos y mínimos según Hattendorf et al., citados por Micucci (2004), son para maíz de $10\text{-}24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; en girasol $5\text{-}9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; en soja $5\text{-}11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

En experimentos realizados por Vilches y Costanzo (2011), con el rendimiento general del cultivo y con el consumo medido por sonda, calcularon la EUA que resultó de $8,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Della Maggiora et al., citados por Vilches y Costanzo (2011), en Balcarce, obtuvieron una EUA de $9,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ mientras que Weir et al., citados por Vilches y Costanzo (2011), en Marcos Juárez, utilizando lisímetros y sin limitantes hídricas, midieron un consumo potencial de 630 mm y una EUA de $6,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

2.6. RIEGO

2.6.1. Manejo del agua de riego

En sistemas de producción bajo riego es de gran importancia conocer el volumen de agua que consume un cultivo en su ciclo para programar las actividades de riego. Además, en condiciones de riego suplementario es necesario conocer el consumo diario de cada cultivo, para determinar las necesidades totales en cada momento del año, calculando la superposición de demanda de los cultivos intervinientes en el sistema productivo (Andriani, 2000).

García (2012), indicó que regar bien es darle a las plantas la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, es decir, antes que el contenido hídrico del suelo les genere un estrés que disminuya su rendimiento. La cantidad de agua a aplicar o lámina depende, en principio, de los parámetros hídricos del suelo. A los efectos del riego se considera no la totalidad del perfil de suelo, sino que este queda limitado por la masa radicular absorbente.

Un suelo, después de recibir lluvias abundantes tiene todos sus poros (macro y micro poros) llenos de agua. Esta condición se llama Suelo Saturado (SS). En estas condiciones, por la falta de oxígeno, las raíces no están en condiciones adecuadas para absorber el agua (García, 2012).

La capacidad de campo (CC) se define como el contenido de agua de un suelo inicialmente saturado luego de que el agua gravitacional ha drenado, el espacio de los macro poros está ocupado por aire y el de los micro poros por agua, donde parte de la cual podrá ser utilizada por las plantas. La tensión de matriz variará ligeramente de un suelo a otro, pero se encontrará en el rango de 0,1 a 0,3 bar (García Préchac et al., s.f.).

A medida que el cultivo va extrayendo agua, esta va quedando cada vez más retenida por la matriz del suelo, hasta un punto en que el cultivo ya no es capaz de seguir extrayendo, a pesar que aún queda agua en el suelo. Esta condición se llama Punto de Marchitez Permanente (PMP) y en esta situación el cultivo muere (García, 2012).

Allen et al. (2006), aseguran que la disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la CC. Debido a que contenidos de humedad por encima de CC no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y son drenados, y debido a que contenidos de humedad por debajo del PMP no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, el total de agua disponible (AD) en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a CC y el PMP.

A pesar de que en teoría existe AD hasta alcanzar el PMP, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el PMP. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ET_c . A medida que disminuya la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir estrés (Allen et al., 2006).

A este punto, que separa el contenido de agua en que la extracción se da en confort hídrico del contenido en que la extracción se da con estrés, es conocido como Umbral de Riego (UR). Este punto también se puede expresar como el porcentaje máximo de agotamiento del AD para no sufrir estrés (p). El UR y el " p " dependen del cultivo, de su etapa de desarrollo, del tipo de suelo y de la demanda atmosférica (García, 2012).

De la misma forma, Allen et al. (2006), indican que el factor " p " varía de un cultivo a otro, varía normalmente entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ET_c ($> 8 \text{ mm d}^{-1}$), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ET_c ($< 3 \text{ mm d}^{-1}$). Un valor de 0,50 para " p " es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos entre ellos la soja.

Allen et al. (2006), indican que el valor de “p” está en función del poder evaporante de la atmósfera. Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ETc es alto, “p” será 10-25 % menor que los valores tabulados, y el suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la ETc es baja, el valor de “p” será hasta 20 % mayor que los valores tabulados. En general se utiliza un valor constante de “p” para cada periodo específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de “p” de acuerdo a la tasa de ETc es $p = 0,5 + 0,04 (5 - ETc)$ donde el valor ajustado de “p” es limitado a $0,1 \leq p \leq 0,8$ y el valor de ETc es en mm día⁻¹.

Allen et al. (2006), también indican que el valor de “p” se puede reducir en un 5-10 % para suelos de textura fina (arcilla), mientras para suelos de textura más gruesa (arenosos), estos pueden incrementarse en un 5-10 %.

Allen et al. (2006), indican que la fracción de AD que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente disponible en el suelo (AFD).

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

2.6.2. Respuesta al riego suplementario

Rodríguez et al. (s.f.), evaluaron la respuesta en el rendimiento de soja al riego suplementario. Los resultados demostraron que existía respuesta significativa al agregado de agua en los componentes del rendimiento, observándose un mayor rendimiento en aquel tratamiento donde la oferta de agua fue mayor, también se observó que el tratamiento que obtuvo mayor rendimiento registró un nivel de ETc muy superior al resto de los tratamientos. El número de granos por m² se incrementó con el aumento de la lámina de riego aplicada, este incremento se asocia en un 96 % con el incremento en el rendimiento logrado. Como consecuencia de ello, los tratamientos con mayor número de granos registraron un menor peso de los mismos en relación a los tratamientos en secano.

En estudios realizados por Calviño y Sadras (1999) en Argentina, se encontró una respuesta diferencial en el rendimiento en relación a la disponibilidad de agua de lluvia. En suelos profundos, la diferencia en el rendimiento estuvo entre 2,1 y 3,1 toneladas, en suelos poco profundos entre 1,3 y 1,6 toneladas. En todos los casos la relación entre el rendimiento y la disponibilidad de agua no es lineal, se alcanza un “plateau”, lo que indica que hay un efecto diferencial de los distintos ambientes. Comparando datos de dos chacras que recibieron similar cantidad de agua durante la etapa vegetativa y reproductiva temprana pero una recibió agua menos abundante

durante el período reproductivo que es el momento donde se concreta el rendimiento, probablemente contribuyó a las diferencias en rendimiento entre ambas chacras, siendo responsable el número de granos por superficie del 94 % de esta variación en rendimiento.

Zampedri y Currie (2000), concluyeron de acuerdo a un experimento donde se comparó el rendimiento de una parcela regada contra una parcela sin riego, que el aporte de riego aun en pequeñas dosis en momentos de estrés hídrico incide favorablemente sobre el rendimiento. En aquella parcela bajo riego el rendimiento fue un 47,5 % superior al testigo no regado. También se encontraron diferencias significativas en el número de plantas por metro lineal y en el número de nudos por planta a favor de la parcela regada.

En estudios realizados por Salinas et al. (1996), donde el objetivo fue observar el comportamiento diferencial de los cultivares de soja frente a diferentes disponibilidades hídricas. En situaciones de abundante disponibilidad hídrica en plena floración (R2), la tasa transpiratoria difirió entre cultivares, los cultivares de ciclo más corto presentaron una tasa más alta que los cultivares de ciclo largo. Bajo la condición de sequía hubo reducción en el tamaño de las semillas y un incremento en el número de semillas poco desarrolladas en todos los cultivares. La sequía en el período reproductivo afectó el llenado de los granos por lo que aumentó el número de semillas poco desarrolladas, pero las que completaron su crecimiento superaron en calidad fisiológica a las producidas en condiciones irrigadas.

Verneti (2002), realizó un estudio para ver el efecto del riego sobre el rendimiento de soja y sus componentes, a su vez se compararon diferentes modalidades de riego. Mediante el análisis de los diferentes subperíodos fenológicos se llegó a la conclusión de que no existen diferencias en la metodología de riego utilizada. Entre los ensayos bajo riego no hubo diferencias significativas en cuanto a la altura de planta, sí se observaron diferencias al compararlos con los ensayos sin riego donde la altura de planta fue menor. El número de vainas y de semillas por planta mostraron diferencias significativas con los sistemas sin riego, lo mismo se observó en el rendimiento, no encontrándose diferencias entre los distintos sistemas de riego. En conclusión, la soja responde muy bien al riego pero no hay diferencias en cuanto al sistema de riego utilizado.

Bidegain (2012), analizó la disponibilidad hídrica durante todo el ciclo y su efecto sobre el rendimiento obtenido. Cuando en todo el ciclo del cultivo ocurren lluvias de entre 200 y 300 mm se logran rendimientos que corresponden a un 40 % del rendimiento potencial, este tipo de comportamiento se asocia con deficiencias hídricas severas durante todo el ciclo. En sentido opuesto, cuando ocurren PP muy elevadas (entre 1300-1400 mm durante todo el ciclo) el rendimiento alcanzado se ubicó un 70 % por encima de los potenciales. En cambio cuando solo se analizan las PP durante el período R3-R6 se concluye que cuando las PP durante ese período fueron menores a 100

mm en la mayoría de los casos no se logró concretar el 50 % del rendimiento potencial. Cuando las PP son muy altas en este período (R3-R6) no existe un patrón de comportamiento claro, lo que podría asociarse con la distribución de las PP más que con la disponibilidad de las mismas.

Musick et al. (1976), indican que los mejores rendimientos bajo riego se obtuvieron cuando se dejaba agotar hasta un 60 % el agua útil del suelo en los primeros 60 cm del perfil, de esta forma no se registró un estrés visible en las plantas por lo que se consideró una forma de riego adecuada. Sin embargo, cuando se regó con 40 % de agotamiento se redujo el rendimiento.

En estudios realizados para conocer el efecto del AD en las diferentes etapas del ciclo del cultivo, se encontraron diferencias según Bidegain (2012), en el periodo siembra-R3 y R3-R6. Las situaciones donde el AD desde la siembra a R3 fue mayor al 40 % presentaron rendimientos significativamente mayores al mismo período con menos del 40 % de AD. El mismo comportamiento se observó cuando se analizó el periodo R3-R6 con un 60 % del AD. Las PP durante el PC fueron determinantes del rendimiento, cuando se lograron más de 300 mm durante este período, los rendimientos superaron en un 70 % el potencial. Los mayores rendimientos estuvieron asociados a disponibilidades mayores al 40 % de AD durante el período siembra-R3 y mayores al 60 % de AD para el período R3-R6.

De la misma forma, Shaw, Muchow y Sinclair, Dardanelli et al., citados por Andrade y Sadras (2000b), indican que el crecimiento y el consumo de agua se reducen cuando el contenido hídrico del suelo en la zona explorada por las raíces se encuentra por debajo del 40-60 % del agua útil.

Grasso y Montero (2011), en un experimento desarrollado en Paysandú, concluyeron que las deficiencias hídricas durante el PC provocan una disminución del rendimiento del 50 %. El componente que se ve más afectado en esta situación fue el número de granos por m² que presentó una correlación de 0,98 con el rendimiento. Las diferencias entre el número de granos en los tratamientos con y sin riego se les atribuyen a la reducción en la TCC durante el PC debido a las deficiencias hídricas, por lo tanto la baja disponibilidad de agua no solo afectó el rendimiento sino también la acumulación de MS.

Vivan et al. (2013), sostienen que es necesaria la aplicación de riego suplementario, teniendo un componente de variaciones significativo entre años. Las reducciones del rendimiento en relación al porcentaje de lámina de riego aplicada varían entre 25 y 45 % en relación al rendimiento máximo.

Carballo de Silva (1990), indica que excesiva humedad al comienzo de la etapa reproductiva hace incrementar la altura de las plantas y puede producir volcamiento,

mientras que si el cultivo recibe demasiada agua al final de la etapa reproductiva se puede alargar el ciclo y desmejorar la calidad de las semillas.

En estudios de la programación del riego para la soja se ha demostrado que evitar el riego durante las etapas vegetativas podría resultar en rendimientos altos, como los obtenidos si el cultivo fuera regado durante toda la estación de crecimiento (Ashley y Ethridge, Elmore et al., Spetch et al., citados por García y García et al., 2010).

2.6.3. Riego deficitario

El riego deficitario es una herramienta para el manejo de los cultivos que se fundamenta en la estrategia de reducir el agua aplicada con el mínimo impacto sobre la producción (Fabeiro y López, 2005).

Hargreaves y Samani, citados por Fabeiro y López (2005), señalan que los riegos deficitarios pueden proporcionar retornos económicos por unidad de superficie, igual o superior que los riegos para máximas producciones, lo que evidentemente indica eficiencia del agua también iguales o superiores.

De la misma forma, Krida et al., citados por Rosadi et al. (2005), señalan que el riego deficitario es una estrategia de riego que toma en cuenta las deficiencias hídricas para el cultivo y puede reducir la demanda evaporativa, haciendo así más eficiente el uso de los recursos hídricos.

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

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

En la ecuación anterior, p es la fracción del total de AD, que un cultivo puede extraer del suelo a través de la zona de la raíz sin sufrir estrés hídrico (Rosadi et al., 2005).

Por otra parte, Allen, citado por Rosadi et al. (2005), hace mención a la evapotranspiración ajustada (E_{Taj}) cuando el cultivo está bajo estrés hídrico (contenido de agua del suelo por debajo del q_c).

$$E_{Tc \text{ adj}} = K_s E_{Tc}$$

K_s es el coeficiente de estrés del cultivo y es de suma importancia para la planificación del riego deficitario, ya que permite conocer la ET_{aj} (Rosadi et al., 2005).

Según Doorenbos y Kassam, citados por Rosadi et al. (2005, 2007), es necesario derivar la relación entre la disminución del rendimiento relativo y déficit de evapotranspiración relativa, con el fin de cuantificar el efecto del estrés hídrico, la cual está comprendida en la siguiente ecuación:

$$1 - Y_a/Y_c = K_y (1 - ET_{aj}/ET_c)$$

Donde $1 - Y_a/Y_c$ es la disminución en el rendimiento relativo, $1 - ET_{aj}/ET_c$ es la disminución de la evapotranspiración relativa y K_y es el factor de respuesta del rendimiento, que según Doorenbos y Kassam, citados por Rosadi et al. (2005), el K_y de soja para todo el período de crecimiento bajo déficit de agua fue de 0,85.

Rosadi et al. (2005), aseguran que el riego deficitario puede ejecutarse de manera tal que permita mantener el contenido de agua del suelo por debajo del q_c logrando aun así rendimientos lo suficientemente altos. Y para esto es necesario conocer los valores de q_c y K_s para determinar una gestión eficiente del agua de modo que el área de cultivo de soja se puede aumentar.

Los riegos deficitarios de alta frecuencia consisten en regar todo el ciclo por debajo de la demanda del cultivo pero utilizando una frecuencia de aportes suficientemente alta para evitar la aparición de situaciones de estrés trascendentes (Fabeiro y Lopez, 2005).

Fabeiro y López (2005), señalan que el riego deficitario de alta frecuencia constituye una clara alternativa, pero no es menos cierto que presenta algunas limitantes importantes, como no considerar que el déficit hídrico puede resultar más o menos trascendente en función del momento fenológico. De esta manera, surge el riego deficitario controlado (RDC), basado en la idea de reducir los aportes de agua en aquellos períodos fenológicos en los que el déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción y calidad de cosecha y, cubrir plenamente la demanda durante el resto del ciclo del cultivo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicada sobre la ruta 3, km 363, en el Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22′ S 58°03′ O), durante el año agrícola 2013-14. El experimento se realizó sobre un suelo Brunosol subéutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, incluida dentro de la formación Fray Bentos.

Cuadro 1. Características hidrológicas del suelo

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

Dap: Densidad aparente, CC: Capacidad de campo, PMP: Punto de marchitez permanente, CAAD: Capacidad de almacenaje de AD.

3.1.1. Manejo experimental

El ensayo se sembró el 21 de noviembre con una sembradora experimental (Wintersteiger PLOTMAN, Gesellschaft m.b.n. &CO, Austria), se utilizó una distancia entre surcos de 0,40 m. El cultivar utilizado fue el DM 5.1i, con hábito de crecimiento indeterminado. En V2 se realizó ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr una población de 300.000 plantas ha⁻¹.

El cultivo se mantuvo libre de malezas, enfermedades y plagas. Para ello se realizaron dos aplicaciones de Glifosato con 2 lt ha⁻¹ de producto comercial para controlar malezas y tres aplicaciones de Lorsban a razón de 1 lt ha⁻¹ de producto comercial para controlar lagartas foliares (Anticarsia y Rachiplusia).

Cuadro 2. Calendario de eventos fenológicos

Fecha	Estado Fenológico	Días post emergencia
21/11/2013	Siembra	
02/12/2013	Emergencia	0
03/01/2014	R1	33
28/01/2014	R4	58
28/02/2014	R6	89
06/04/2014	R8	126

Para la aplicación de la metodología experimental se consideró el período comprendido entre los estadios R4-R6 (Fehr y Caviness, 1977) como el período crítico para la determinación del rendimiento (PC).

3.1.2. Tratamientos

T1: Bienestar hídrico en todo el ciclo (60 % AD o más durante el PC y 40 % de AD o más durante ENC).

T2: Bienestar hídrico en PC y deficiencias hídricas en ENC (60 % AD o más durante el PC y menor a 40 % de AD en las ENC).

T3: Bienestar hídrico en PC y floración, y deficiencias hídricas en ENC (60 % AD o más durante el PC y 40 % o más en floración, y menor a 40 % AD en ENC).

T4: Riego deficitario controlado (50 % de lámina neta de riego del T1).

T5: Secano.

En el presente trabajo se entiende por deficiencias hídricas valores de AD menores a 40 % en las ENC y menores a 60 % de AD en el PC, como también se entiende por bienestar hídrico, el contenido hídrico del suelo por encima de estos umbrales.

Los tratamientos se distribuyeron en 15 unidades experimentales. Cada unidad experimental (parcela) estuvo constituida por 5 hileras de cultivo de 5 m de longitud, sembradas a una distancia entre filas de 0,4 m.

Para determinar los umbrales hídricos de suelo definidos, se realizaron dos tipos de intervenciones: riego suplementario y contención de las PP en los tratamientos con déficit hídrico a través de la utilización de simuladores de sequía parcelarios y móviles. Los mismos fueron construidos en estructuras de hierro con cubiertas de lonas impermeables, diseñadas con techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Las dimensiones de los simuladores se adecuaron al tamaño de las parcelas siendo estos de 2 m x 5 m x 1.5 m. Estos fueron colocados sobre las parcelas de cultivo en las que se definió controlar el agua, antes de cada evento de PP y retirados inmediatamente después de los mismos, a modo de no provocar modificaciones significativas en las condiciones de radiación solar y temperaturas a las que estuvieron expuestos los cultivos en el campo. Para definir la colocación de los simuladores se utilizaron pronósticos meteorológicos de corto plazo. Estas parcelas estuvieron limitadas externamente por una “ronda” de 0,2 m de altura construida en tierra, a modo de impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento. También fueron construidos desagües para evacuar el exceso de agua proveniente de los techos de los simuladores.

El sistema de riego utilizado fue a través de goteo con cintas con goteros cada 0,2 m y con un caudal/gotero de 1,49 lt h⁻¹.

Para definir la lámina de riego a aplicar diariamente se realizó un balance hídrico (BH) de suelos simplificado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$BH = R + PP - ETc$$

Siendo R= mm agregados de agua de riego, PP= mm de lluvia y ETc= mm de evapotranspiración de cultivo, calculada por el método $ETc = ETo \times Kc$. Donde ETo es la evapotranspiración del cultivo de referencia y Kc es el coeficiente del cultivo. La ETo fue calculada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith y el Kc recomendados por FAO.

3.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Hipótesis biológicas

Disponibilidades hídricas iguales o superiores a 60 % de AD durante el PC de determinación de rendimiento, y superiores o iguales a 40 % de AD en las ENC, permiten obtener rendimientos potenciales para el ambiente de producción en el que se desarrolla el cultivo.

3.2.2. Hipótesis estadísticas

Ho: Las medias de los tratamientos son iguales: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$ o los efectos de los tratamientos son iguales: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$

Ha: Existe al menos una diferencia entre las medias de los tratamientos o existe al menos un efecto de los tratamientos diferente.

3.2.3. Diseño experimental

El diseño utilizado fue un DBCA (Diseño en Bloques Completos al Azar), con tres bloques y cinco tratamientos.

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

Y_{ij} : rendimiento en kg ha^{-1} .

μ : media poblacional del rendimiento.

α_i : efecto de la i -ésimo tratamiento.

β_j : efecto del j -ésimo bloque.

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

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

j : 1, 2, 3

Supuestos:

- Al modelo:

- Es correcto (en relación al material experimental)
- Es aditivo
- No existe interacción bloque por tratamiento

-A los errores experimentales:

- Son variables aleatorias
- $\varepsilon_{ij} \sim N$
- $E(\varepsilon_{ij}) = 0$ para todo i, j
- $V(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2$ para todo i, j
- Son independientes

Por definición $\alpha_i = \mu_i - \mu$

Criterios de decisión:

-Si las diferencias entre las medias muestrales son “suficientemente” grandes se rechaza H_0 . Si la variación entre medias de tratamientos (CM tratamientos) es “suficientemente” grande se rechaza H_0 . Si el p-valor es $= o < \alpha = 0,05$ se Rechaza H_0 .

-Si la variación dentro de los tratamientos (CM error) es “suficientemente” grande no se rechaza H_0 . Si el p-valor es mayor a $\alpha = 0,05$ No se Rechaza H_0 .

3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS

3.3.1. Determinaciones durante el ciclo del cultivo

En el desarrollo del cultivo se realizaron dos muestreos de MS en la etapa reproductiva, siendo estos correspondientes a los estadios R4 y R6 (Fehr y Caviness, 1977). Se cortó a ras del suelo 1 m lineal de plantas por parcela, estas muestras fueron colocadas en estufa a una temperatura de 60 °C hasta que mantuvieran el peso constante. Los muestreos tienen como objetivo evaluar la evolución de la acumulación de biomasa aérea, y además fueron utilizados para determinar la TCC R4-R6.

Se elaboraron los BH de suelo, en los que se estimó las pérdidas y ganancias de agua en el suelo. En este sentido Allen et al. (2006), exponen que al momento de realizarse el BH se considera la CAAD, profundidad radicular, y el estado de desarrollo del cultivo, aspectos que se relacionan con la intensidad del déficit hídrico.

Por otra parte, se estudió la evolución del AD en cada tratamiento, para corroborar que las condiciones hídricas de estos fueran acordes a los objetivos planteados y que se mantengan dentro de los estándares señalados. Además de tener un indicador mientras se realizaba el ensayo de cuándo y cuánto regar, debido a este análisis se pudo observar una situación en la que el porcentaje de AD superó el factor de agotamiento (p) establecido. Este caso se da a los 26 días post emergencia, correspondiente al día 27/12/2013, momento en el que ocurre un problema en el sistema de riego, determinando que las parcelas del T1 fueran regadas de forma involuntaria por 2,5 hs.

3.3.2. Determinaciones a cosecha

Para estimar los componentes del rendimiento se cosechó manualmente 1 m lineal de plantas representativas de la hilera central de cada parcela para evitar el efecto “borde”. Al tallo principal se le midió altura de planta, número de nudos fértiles, número de vainas, número de granos y número de ramas, a estas últimas se les realizaron las mismas mediciones.

Además el rendimiento se estimó en cada parcela cosechando 8 m lineales, en los que se midió porcentaje de humedad, peso de mil granos y peso total.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión estudiantil 2013. Con este se realizaron:

Análisis de la varianza

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

Pruebas de Comparación Múltiple

Se realizó una prueba de comparación múltiple (Tukey), al 5 % de significancia.

Análisis de correlación

Se analizaron las variables de interés, de forma de obtener una medida de la magnitud de asociación entre las variables, mediante el coeficiente de Pearson.

3.5. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

3.5.1. Precipitaciones

En la Figura 1, se puede observar las PP mensuales registradas en la estación meteorológica automática de la EEMAC durante la etapa del cultivo y los valores promedio del período histórico 1961-2009, registradas en Paysandú (en base a datos proporcionados por MDN. DNM). Se puede ver que las PP de primavera-verano 2013-14 se caracterizaron por ser muy superiores a la media en los meses de enero y febrero, 165 y 194 mm respectivamente. También se puede observar que las PP de diciembre y marzo fueron inferiores a la media histórica.

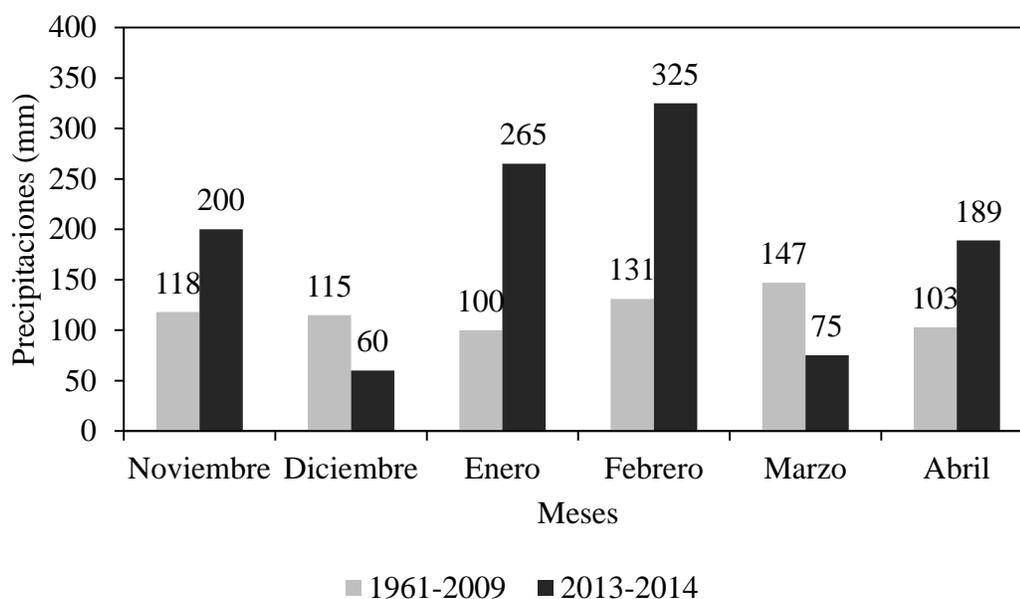


Figura 1. Precipitaciones ocurridas durante 2013-2014 obtenida en la estación meteorológica automática de la EEMAC, Facultad de Agronomía y valores promedio de la serie histórica 1961 a 2009 (elaborado en base a datos proporcionados por la Dirección Nacional de Meteorología).

Cabe destacar que las mayores PP ocurridas en el ciclo del cultivo se dieron en el mes de febrero, en el cual se ubicó la mayor parte del PC de determinación de rendimiento del cultivo (R4 a R6 de la escala de Fehr y Caviness, 1977).

Las PP totales durante la fase del cultivo fueron de 775 mm siendo más de 150 % superiores con respecto a la media histórica, lo que produjo reducciones en la RS.

3.5.2. Radiación solar incidente

En la Figura 2 se puede observar la RS incidente del período 2002-12 y la RS registrada durante la etapa del cultivo. En la misma se destacaron las menores radiaciones de los meses de enero y febrero con respecto a la década 2002-12, como consecuencia de las mayores PP ocurridas en estos meses y por ende una mayor proporción de días nublados.

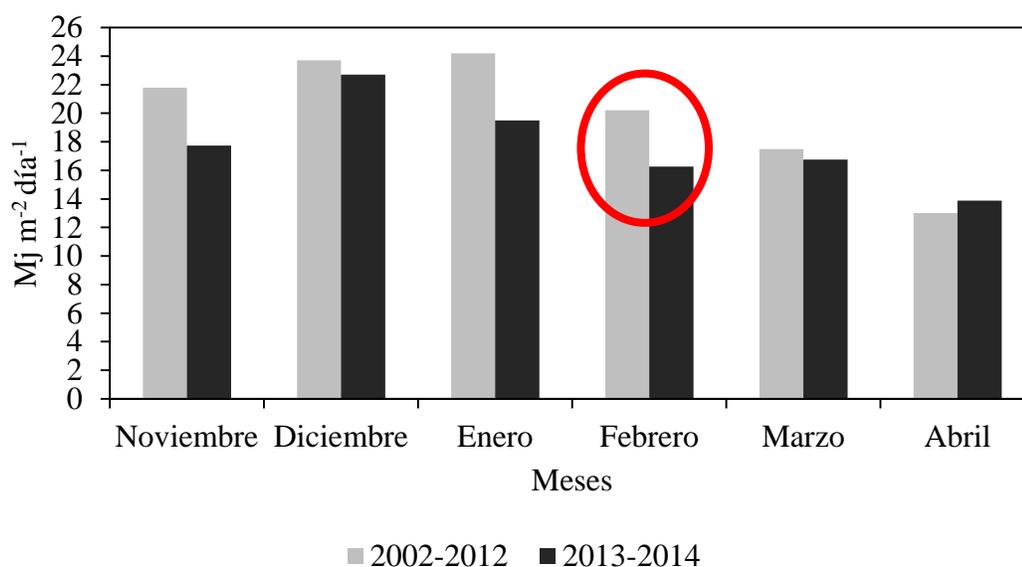


Figura 2. Radiación solar ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurrida durante el año agrícola 2013-14 y valores promedio de la serie histórica 2002-12, obtenidas de la estación meteorológica automática de la EEMAC, Facultad de Agronomía.

Esta disminución del 20 % de la RS ocurrida en febrero con respecto al rango histórico, coincidió con la fase temporal del cultivo del PC de concreción de rendimiento. Asimismo es importante destacar la menor RS ocurrida en el mes de enero en un 20 % con respecto al rango histórico, la cual coincidió con la fase temporal de floración del cultivo. Estos acontecimientos pudieron traer como consecuencia una menor acumulación de MS y una menor TCC, y por lo tanto la imposibilidad de concretar los potenciales de rendimiento (Andrade y Sadras 2000b, Giménez 2014).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

4.1.1. Evolución del agua disponible en el suelo

En las Figuras 3, 4, 5, 6 y 7 se muestra la evolución del porcentaje de AD en el suelo a lo largo del ciclo del cultivo para los distintos tratamientos evaluados.

En la Figura 3 se observa que el contenido de AD en el T1 se encontró en la mayor parte de la fase vegetativa por encima del 40 %, no obstante se pueden observar periodos cortos por debajo de este umbral, los cuales no afectaron el crecimiento del cultivo ya que los mismos se ubicaron en las primeras etapas del ciclo (VC y V1), siendo éstas las menos sensibles a la disponibilidad hídrica, como lo indicó Andriani (2002). El AD durante el PC y la madurez estuvo por encima del 60 y 40 % respectivamente, por lo tanto podemos asegurar que el T1 se encontró en situación de bienestar hídrico durante todo el ciclo, de acuerdo a lo indicado por Musick et al. (1976).

El T2 como se puede ver en la Figura 3 presentó deficiencias hídricas intensas, por debajo del 20 % AD, durante la fase vegetativa y la floración, superándose estas deficiencias en R4 con un porcentaje de AD superior a 60 % durante el PC y por encima de 40 % en la fase de madurez o sea en etapas no críticas (ENC). Sin embargo cabe aclarar que el BH de suelos simplificado utilizado sobreestima las pérdidas de agua, por lo tanto los valores registrados fueron muy bajos durante la etapa vegetativa y la floración.

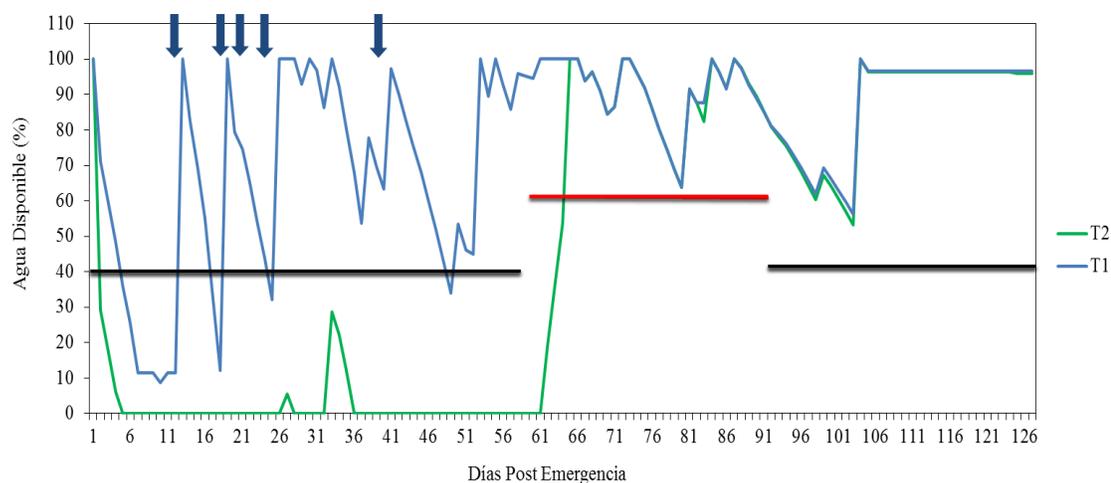


Figura 3. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T2 (deficiencias hídricas hasta periodo crítico) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y

la línea roja para el periodo crítico (PC). Las flechas en azul indican los eventos de riego para el T1.

En la Figura 4 se puede ver que en el T3 el porcentaje de AD en el suelo fue cercano a cero durante la fase vegetativa, ésta restricción hídrica fue levantada posteriormente en la fase de floración manteniendo el porcentaje de AD por encima de los umbrales determinados en este estudio.

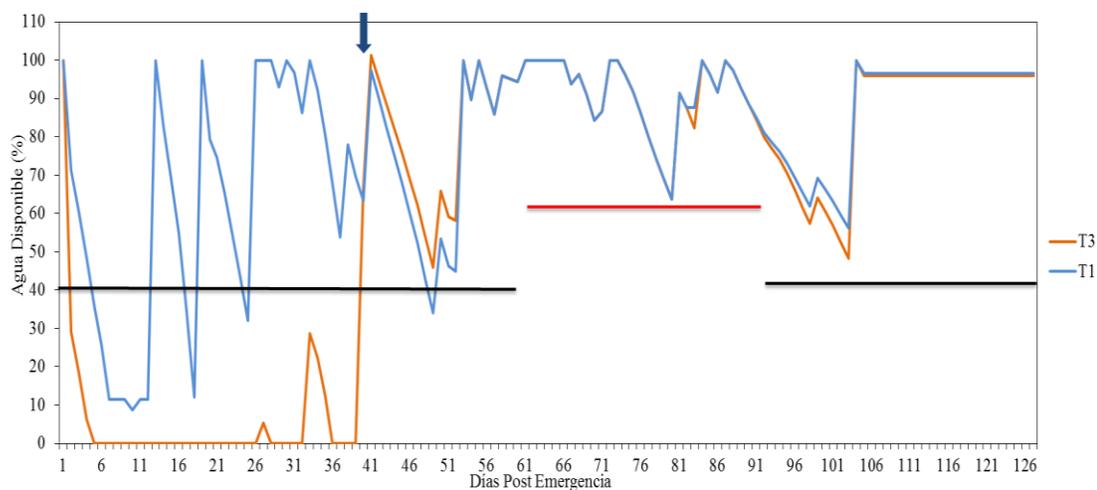


Figura 4. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T3 (deficiencias hídricas hasta floración) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC). La flecha en azul indica el evento de riego para el T3.

En la Figura 5 se observan los tratamientos en los cuales se indujeron deficiencias hídricas. En el T3 este periodo ocurrió solamente hasta la fase de floración, mientras que en el T2 fue mas extenso, levantándose la deficiencia hídrica en el PC. Luego de levantadas las mismas ambos tratamientos dispucieron de bienestar hídrico hasta el fin del ciclo del cultivo.

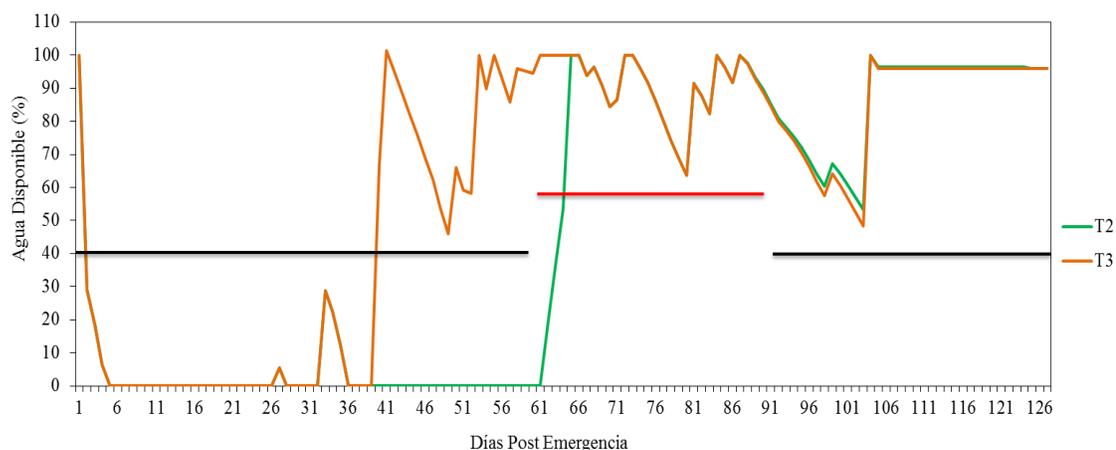


Figura 5. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T2 (deficiencias hídricas hasta el periodo crítico) y en el T3 (deficiencias hídricas hasta floración) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).

En la Figura 6 se puede observar que el T4 presentó en gran parte del ciclo el mismo volumen de agua que el T1. Esto es consecuencia de las características del año, el cual fue lluvioso, lo que provocó que no se pudiera llevar a cabo correctamente la planificación realizada para los diferentes tratamientos, ya que los momentos de riego fueron escasos y ocurrieron al inicio del ciclo del cultivo.

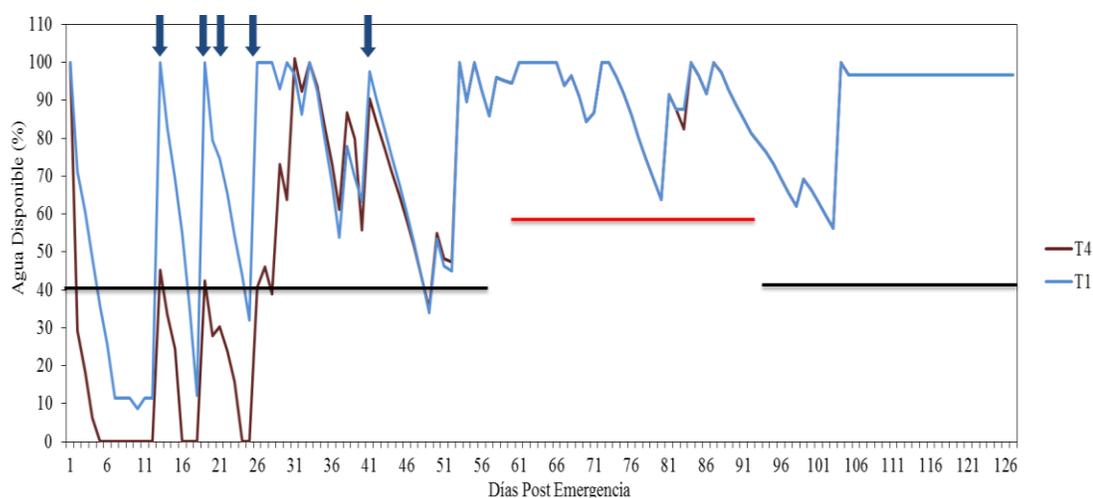


Figura 6. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T4 (riego deficitario controlado) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las

líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC). Las flechas en azul indican los eventos de riego para el T4.

En la Figura 7, se puede ver la evolución del porcentaje de AD de los tratamientos desarrollados en secano. En la misma se destacan las deficiencias hídricas en los primeros 26 días del cultivo, así como también las deficiencias de agua ubicadas en la etapa de floración con una duración aproximada a 10 días. Posteriormente a esto se recuperó el porcentaje de AD del suelo por encima de los umbrales de bienestar hídrico definidos, o sea 40 % en ENC y 60 % en PC (Bidegain, 2012), como consecuencia de las PP ocurridas.

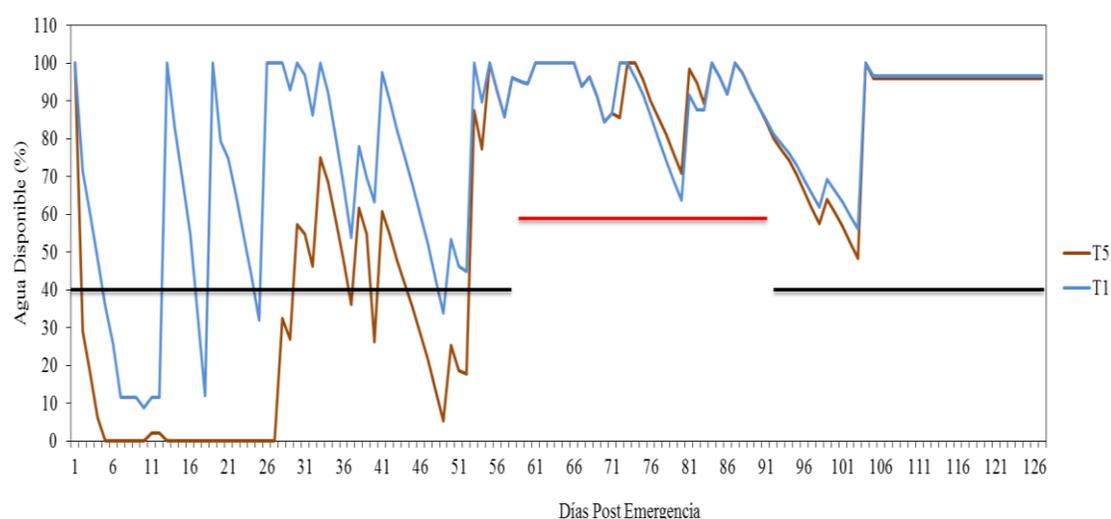


Figura 7. Evolución del porcentaje de agua disponible en el T1 (bienestar hídrico) y en el T5 (secano) en relación a los días pos emergencia (DPE). Las líneas negras indican el umbral de riego para las etapas no críticas (ENC) y la línea roja para el periodo crítico (PC).

4.1.2. Parámetros de crecimiento

4.1.2.1. Materia seca acumulada al inicio del Período Crítico

Como se observa en la Figura 8 el T1 fue el tratamiento que tuvo mayor deposición de MS a inicios del PC, conjuntamente con el T4 y el T5. El T2 obtuvo el 35 % de acumulación de MS que el T1, esto fue consecuencia de la baja disponibilidad hídrica del T2 hasta R4. El T3 acumuló el 61 % de MS en comparación al T1 a causa de la menor disponibilidad hídrica en el suelo hasta la etapa de floración. Estos resultados coinciden con la disponibilidad de agua que tuvo cada tratamiento hasta el comienzo del PC.

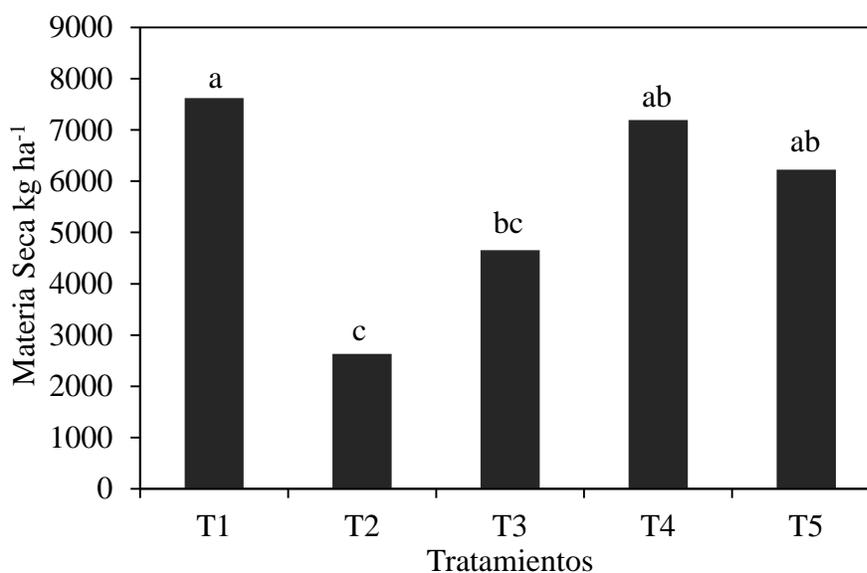


Figura 8. Materia seca (kg ha⁻¹) depositada a inicio del periodo crítico (R4) en los diferentes tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Las diferencias en MS entre los tratamientos que se observa en la Figura 8 coinciden con lo expresado por Andrade y Sadras (2000b), quienes manifestaron que cultivos sometidos a deficiencias hídricas reducen la interceptación de radiación y/o disminuyen la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. Esta reducción es consecuencia de una menor expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar. Los resultados asimismo coinciden con los expresados por Andriani (2002) que asegura que deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50 % de AU en el suelo) provocadas durante el periodo de emergencia-floración disminuyen el área foliar y la altura de planta.

La baja acumulación de MS del T2 concuerda con lo reportado por Dardanelli et al. (1991), quienes mencionaron que deficiencias de agua ocurridas en las etapas reproductivas disminuyen significativamente la acumulación de MS por el cultivo.

Por lo tanto debido a las deficiencias hídricas provocadas, el T2 y el T3 no desarrollaron un canopeo que permitiera maximizar la interceptación de radiación solar durante la etapa reproductiva temprana, obteniendo una baja acumulación de MS en el estadio R4.

4.1.2.2. Materia seca acumulada al final del Período Crítico

La Figura 9 muestra la acumulación de MS registrada a R6 entre los tratamientos evaluados. En esta etapa no se detectaron diferencias significativas, sin

embargo el T2 y el T5 presentaron una acumulación de MS menor que el T1. Esto se explica por la baja acumulación de MS en el T2 en la etapa inicial del PC y en el caso del T5 la menor acumulación de MS fue consecuencia de la baja TCC durante el PC.

Las diferencias en acumulación de MS hasta R6 con respecto a la deposición de biomasa a R4 fue consecuencia de que la mayor acumulación ocurre después de R5.5, tal como lo reportaron Mondino y Gómez (2006).

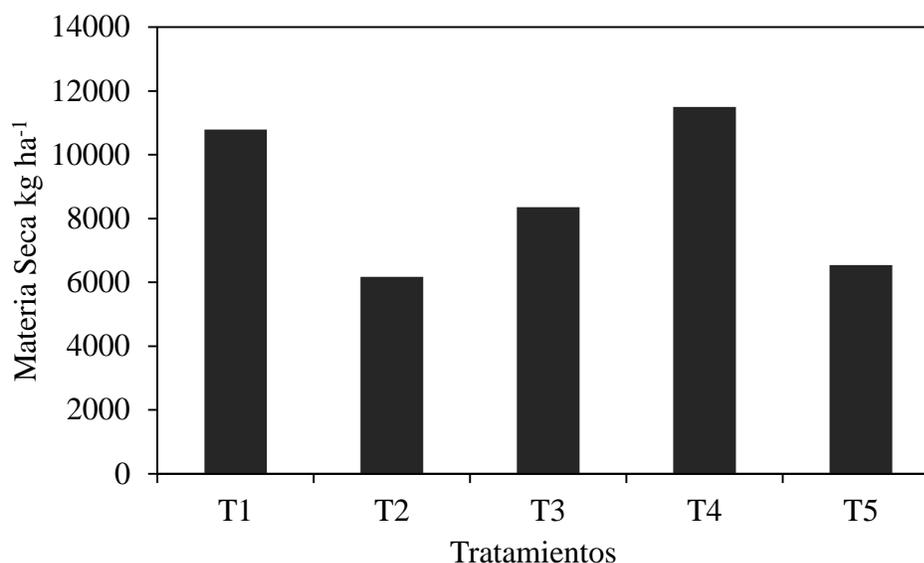


Figura 9. Materia seca (kg ha⁻¹) al fin del periodo crítico (R6) en los diferentes tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Los valores de MS obtenidos en cada tratamiento son coincidentes con la cantidad de agua recibida durante el ciclo del cultivo. El T1 y el T4 recibieron mayor volumen de agua, por lo tanto fueron los que obtuvieron mayor acumulación de MS, contrariamente el T2 fue el de menor disponibilidad hídrica lo que coincidió con la acumulación de MS más baja.

El T1 y el T4 tuvieron acumulaciones de MS del orden de 10787 y 11497 kg ha⁻¹ respectivamente, estos tratamientos no expresaron su potencial debido a la reducida radiación solar (RS) incidente, las mediciones realizadas indican 13,6 MJ m⁻² día⁻¹ y 3,9 MJ m⁻² día⁻¹ menor a la media histórica durante todo el ciclo y PC, respectivamente. Las bajas RS incidente fueron causadas por las elevadas PP que fueron 400 y 194 mm superiores a la media histórica durante todo el ciclo y PC, respectivamente en este año. Giménez (2014) reportó valores de 16168 kg ha⁻¹ a R6 en un ensayo llevado a cabo en los años 2010-11, el cual fue un año de mayor radiación solar (27 y 30 % superior al presente ensayo en todo el ciclo y en PC, respectivamente) lo que explicó las diferencias de acumulación de MS. Grasso y Montero (2011) para un año con baja RS incidente

(3,5 MJ m⁻² día⁻¹ menor a la media histórica en el PC) obtuvieron 8768 kg ha⁻¹ de MS en R6, esta menor MS acumulada con respecto al presente ensayo es debido a un menor largo del ciclo (aproximadamente 20 días).

4.1.2.3. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la tasa de crecimiento durante el Período Crítico

En la Figura 10 se observa el comportamiento de la TCC durante el PC para cada tratamiento, no fueron detectadas diferencias significativas en este parámetro. Sin embargo el T5 presentó el 7,5 % de la TCC lograda por el T4, lo que significó una disminución de la TCC de 124 kg ha⁻¹ día⁻¹. Esto se debe a que el T5 logró a R4 el 95 % de acumulación de MS con respecto al total del ciclo, lo que se diferencia con respecto al resto de los tratamientos, los cuales obtuvieron la máxima acumulación de MS a R6. Esto fue debido a que el T5 se recuperó de las deficiencias hídricas que tuvo en la fase vegetativa y en la floración, antes que los demás tratamientos. Además dichas deficiencias no fueron tan prolongadas como en el T2 y en el T3, esto justificó la baja TCC con respecto a estos tratamientos, ya que los mismos en el PC se recuperaron de sus deficiencias hídricas previas, obteniendo así una mayor TCC. En R6 el T2 consiguió aproximadamente la misma acumulación de MS con respecto al T5, no así el T3 que logró una acumulación más elevada lo que se justificó por un menor tiempo y diferentes fases fenológicas en las cuales ocurrieron las deficiencias hídricas con respecto al T2 y al T5. Esto se tradujo en los bajos rendimientos logrados en el T5, ya que como indica Kantolic (2003b), para obtener altos rendimientos en soja las TCC se deben maximizar durante R1-R6.

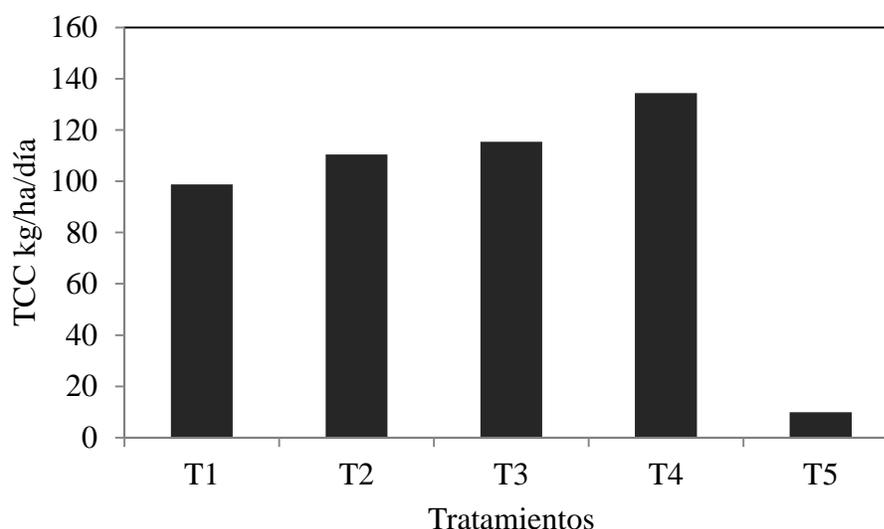


Figura 10. Tasa de crecimiento del cultivo ($\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$) de los diferentes tratamientos durante el periodo crítico. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

Es de destacar la baja TCC durante el PC obtenida en este trabajo en todos los tratamientos. Grasso y Montero (2011), Canosa y Prieto (2013) reportaron, en la misma localidad y con el mismo cultivar, resultados de TCC para el T1 de $250 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, siendo ésta 152 % mayor a las obtenidas en este trabajo. Los resultados obtenidos se adjudican a una RS incidente menor con respecto a los ensayos mencionados, Grasso y Montero (2011) tuvieron registros de $18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ promedio durante el PC, mientras que Canosa y Prieto (2013) reportaron $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ durante el PC, y en este ensayo el promedio de radiación diario fue de $16,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en el PC.

4.1.3. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento

En la Figura 11 se observa que se obtuvieron diferencias significativas en rendimiento entre el T1 con el T5 y entre el T1 con el T2. Estas diferencias fueron 29 y 35 % menores al T1, respectivamente. Las mismas se explican por las deficiencias hídricas intensas (menor al 20 % del AD) en los estadios vegetativos y en la floración, mientras que durante el resto del ciclo del cultivo (PC y maduración) ambos tratamientos contaron con una disponibilidad hídrica por encima de los requerimientos. Como consecuencia de este menor porcentaje de AD en la fase vegetativa y en la floración, existió una menor TCC e inferior deposición de MS afectando en forma negativa los rendimientos. Contrariamente Fehr y Caviness (1977), Dardanelli et al. (1991), Andrade et al. (2000a), Andriani (2002), Karam et al. (2005), Giménez (2014), sostienen que al existir deficiencias hídricas en la fase vegetativa y en la floración no existen disminuciones muy marcadas en los rendimientos.

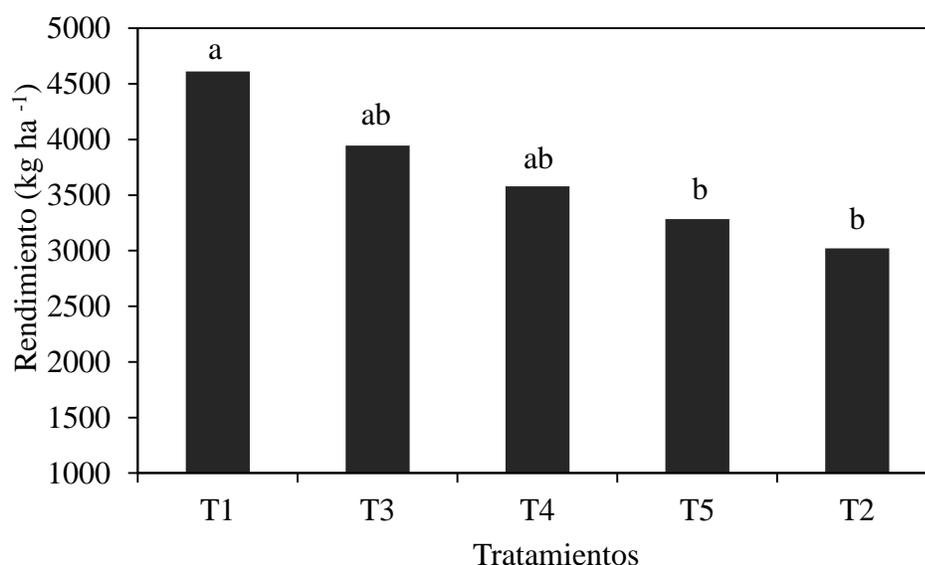


Figura 11. Rendimiento en grano (kg ha⁻¹) para los tratamientos evaluados. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En el T1 se obtuvieron 4611 kg ha⁻¹ de rendimiento, el mismo fue inferior al reportado por Canosa y Prieto (2013) quienes lograron un rendimiento de 6192 kg ha⁻¹. Dicho rendimiento fue alcanzado en un año climáticamente diferente en que se registraron niveles de RS superiores a la media durante casi todo el ciclo del cultivo, las PP tuvieron una distribución acorde a la media histórica, exceptuando en el PC donde las mismas fueron superiores. En cambio en el presente ensayo el rendimiento potencial estuvo afectado por el exceso de PP de 194 mm por encima de la media, y por la menor RS de 3,9 MJ m⁻² día⁻¹ durante el PC, afectando así los rendimientos de todos los tratamientos.

De la misma forma, Grasso y Montero (2011) alcanzaron un rendimiento para el T1 de 4885 kg ha⁻¹ para un año en que las PP fueron 56 % superiores a la media histórica durante el ciclo del cultivo, lo que provocó además la notoria disminución en la RS.

A su vez, Giménez (2014) en un año «Niña» (2010-11), reportó un rendimiento potencial de 7275 kg ha⁻¹ en un tratamiento de bienestar hídrico durante el total del ciclo, estas diferencias de rendimiento se dieron por las condiciones favorables de ese año para este tratamiento, en el mismo hubo una alta RS incidente (27 y 30 % mayor durante todo el ciclo y el PC, respectivamente, con respecto al presente ensayo). Debido a esto, el T1 expresó adecuadamente el potencial de producción que presenta la soja en los ambientes de producción del país en condiciones de alta luminosidad y elevada disponibilidad hídrica (Giménez, 2014).

De acuerdo a lo mencionado, los niveles de RS reportados por Canosa y Prieto (2013) fueron un 15 % superiores a los obtenidos en este ensayo, los alcanzados por Grasso y Montero (2011) estuvieron en un 10 % por encima, mientras que los resultados obtenidos por Giménez (2014) presentaron la mayor diferencia, siendo la misma 27 % superior durante el ciclo del cultivo, lo que justifica las diferencias de rendimientos entre los ensayos.

El T2 como se puede observar en la Figura 11, no se diferenció significativamente con el T3 en cuanto al rendimiento, no obstante este último obtuvo una diferencia de 925 kg ha⁻¹ sobre el T2. Esto es explicado por la disponibilidad hídrica del T3 en la fase de floración, por lo que tuvo una mayor probabilidad de compensar las pérdidas de rendimiento en comparación con el T2, en el cual la restricción se levanta en R4. Estos mecanismos de compensación se deben a la posibilidad de ramificar que presenta la especie, a su extensa etapa de floración y a la producción de un número de estructuras reproductivas superior a las que realmente concreta (Andrade et al., 2000a).

Cabe destacar que no existieron diferencias significativas entre el T1, el T4 y el T3, lo cual es explicado por el bienestar hídrico que existió a partir de la fase de floración hasta el final de su ciclo, en los tres tratamientos.

4.1.4. Relación entre el rendimiento y sus componentes

La Figura 12 muestra la relación entre el rendimiento obtenido por cada unidad experimental y el número de granos por m².

En la Figura 13 se observa cómo se correlacionan el rendimiento con el peso de 1000 granos.

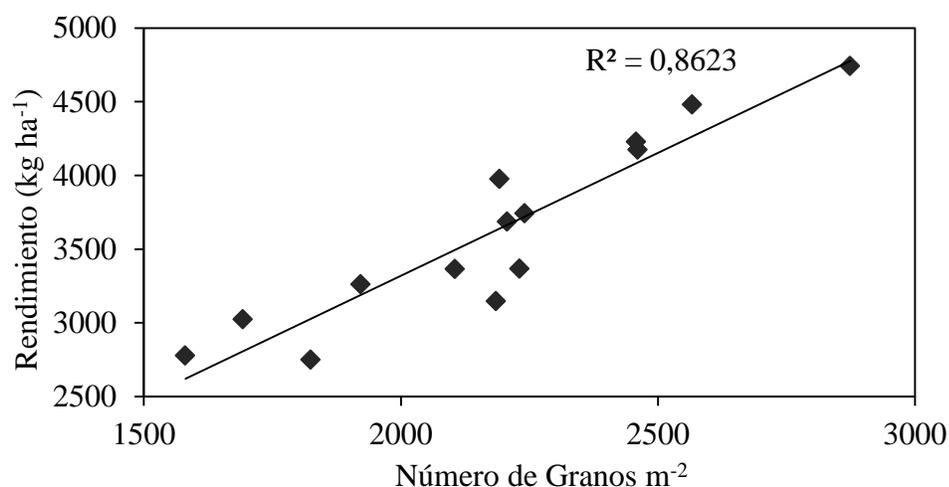


Figura 12. Relación entre el rendimiento obtenido kg ha⁻¹ y el número de granos por m².

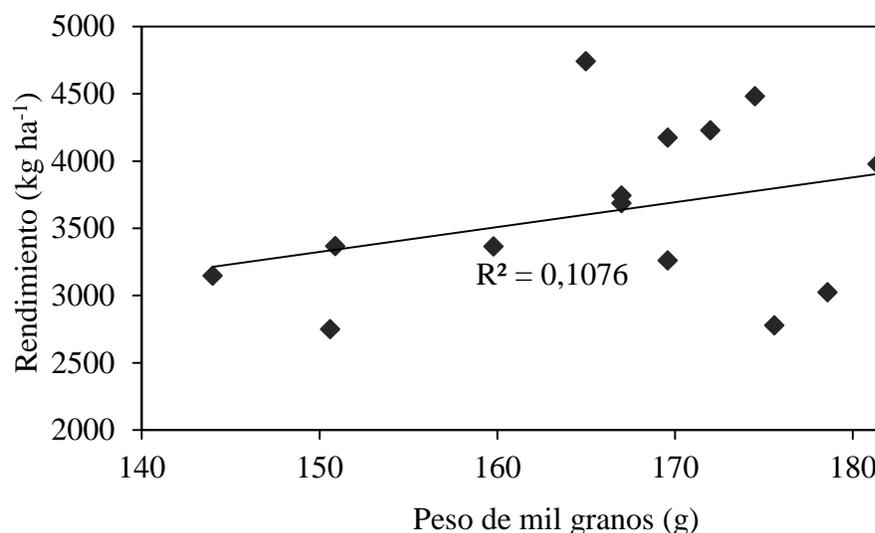


Figura 13. Relación entre el rendimiento obtenido kg ha⁻¹ y el peso de mil granos (g).

En las Figuras 12 y 13 se observa la alta correlación registrada entre el número de granos y el rendimiento obtenido, puede afirmarse que éste es el factor más importante que afectó las variaciones en el rendimiento entre los tratamientos evaluados. De la misma forma, se observa que el peso de los granos tiene una correlación muy baja por lo que no pueden adjudicarse las diferencias en rendimiento debido a éste factor.

Similares resultados fueron reportados por Grasso y Montero (2011) y por Canosa y Prieto (2013).

4.1.5. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento

Cuadro 3. Componentes del rendimiento para las diferentes estrategias de riego.

Tratamientos	Componentes numéricos del rendimiento	
	Número de granos por m ²	Peso de 1000 granos (g)
T1	2720 a	170
T2	1732 c	175
T3	2287 ab	173
T4	2291 ab	156
T5	2057 bc	159

En el Cuadro 3 se puede observar que existen diferencias significativas entre el T1 y el T2 y entre el T1 y el T5, no detectándose diferencias estadísticas para el peso de mil granos. Por lo tanto, las pérdidas de rendimiento se deben principalmente al número de granos por m^2 . El bajo número de granos por m^2 en el T5 está explicado por la baja TCC durante el PC, ya que la mayor proporción de MS acumulada se dio en R4. En cuanto al T2, el bajo número de granos por m^2 se debió a la baja acumulación de MS durante su ciclo, ya que éste tratamiento fue el que tuvo el déficit hídrico más prolongado con respecto a los demás tratamientos. Para ambos casos, la pérdida de rendimiento no fue compensada por el peso de los granos.

El tratamiento que produjo una mayor cantidad de granos por m^2 fue el T1 con 2720 granos. En ensayos anteriores realizados por Grasso y Montero (2011) se obtuvieron resultados similares de 2473 granos por m^2 , estos resultados fueron consecuencia de que se trató de años climáticamente similares en relación a la RS ya que Grasso y Montero (2011) reportaron una RS incidente de $1,46 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ menor a la media, mientras que en el presente ensayo se registraron $2,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ por debajo de la media en el ciclo del cultivo. Por otra parte, Canosa y Prieto (2013) reportaron valores de 3348 granos por m^2 en un año donde la RS fue el factor principal que explicó éste comportamiento ya que la misma estuvo $2,28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ por encima de la media histórica en todo el ciclo.

El valor bajo del número de granos por m^2 obtenido en el T1 de este ensayo con respecto al obtenido por Canosa y Prieto (2013), se debe a las elevadas PP que se produjeron durante el PC en el presente ensayo, las mismas fueron de 194 mm por encima de la media histórica lo que produjo una mayor proporción de días nublados y en consecuencia una reducción en la RS incidente. Esta reducción de $3,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en la RS incidente durante el PC se tradujo en una menor TCC y por lo tanto una menor acumulación MS durante esta etapa, lo que posteriormente afectó los componentes del rendimiento.

Se puede ver que las deficiencias hídricas en la fase vegetativa y floración produjeron una disminución en el número de granos por m^2 como es el caso de T2 y de T5, lo que explicó su menor rendimiento frente a T1 en un 36 y 24 %, respectivamente. Giménez (2014) reportó valores similares con reducciones del rendimiento de 23 %, cuando existió estrés hídrico en ENC.

En el T4 y en el T3 podemos observar (Cuadro 3) que no existen diferencias significativas con T1, ya que estos no tuvieron restricciones hídricas en floración, PC y madurez fisiológica.

La Figura 14 muestra el número de vainas por planta de cada tratamiento. Si bien no existen diferencias estadísticas entre los tratamientos, se puede observar que el T1 tiene 41 % más de vainas por planta con respecto al T2.

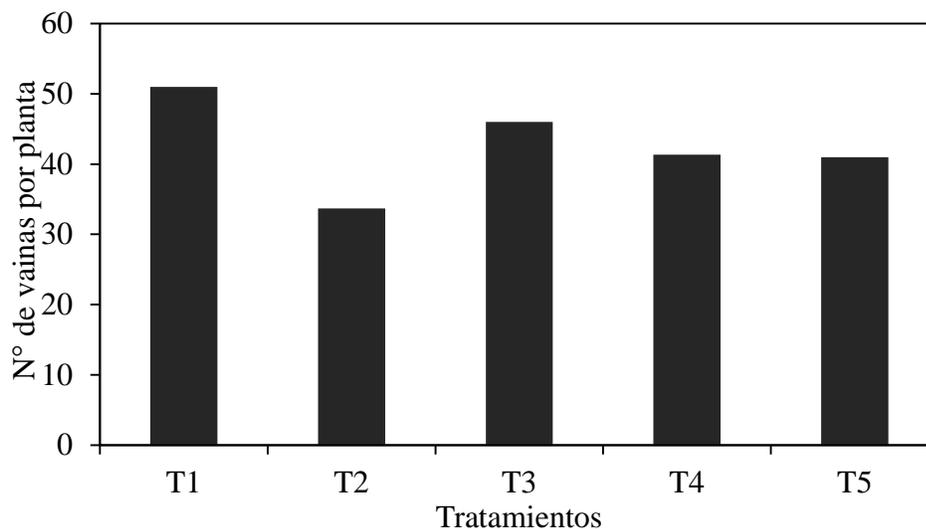


Figura 14. Número de vainas por planta en los diferentes tratamientos. Columnas con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey).

Por esta razón se puede concluir que este sub componente del rendimiento no justificó las diferencias obtenidas en el número de granos por m^2 y en el rendimiento entre los tratamientos.

4.1.6. Efecto de la radiación solar incidente sobre el rendimiento y sus componentes

Cuadro 4. Relación entre el rendimiento en grano y el número de granos por metro cuadrado y la radiación solar incidente en diferentes ensayos de soja a nivel nacional en tratamientos con bienestar hídrico durante el ciclo.

Ensayos	Radiación Solar ($MJ m^{-2} día^{-1}$)		Rendimiento ($kg ha^{-1}$)	Número de granos por m^2
	Media en el ciclo	Media en el PC		
Grasso y Montero (2011)	21,2	18	4885	2473
Canosa y Prieto (2013)	22,3	20	6192	3348
Giménez (2014)	24,3	23,2	7275	4400
Ensayo 2013-14	17,8	16,3	4611	2720

Como se observa en el Cuadro 4 existe una relación de los valores de RS registrados y el rendimiento y el número de granos por m^2 . Cuando la RS promedio durante todo el ciclo y el PC, estuvo por encima de $20 MJ m^{-2} día^{-1}$ existieron rendimientos mayores a $6000 kg ha^{-1}$, sin embargo cuando la RS se ubicó por debajo de

este valor no se superaron los 5000 kg ha⁻¹ de rendimiento. Una tendencia similar ocurrió en el número de granos por m², por encima de 20 MJ m⁻² día⁻¹ promedio para el ciclo se lograron en los experimentos mencionados más de 3000 granos por m².

Por lo que se puede deducir que al no existir limitantes hídricas durante el ciclo del cultivo el nivel de RS incidente es un factor determinante del potencial del rendimiento en soja, siendo más significativo si la máxima RS coincide con el PC.

4.1.7. Evapotranspiración del cultivo y eficiencia de uso del agua en el tratamiento con bienestar hídrico en el ciclo

En la Figura 15 se muestra la evolución de la ETc estimada durante el ciclo de crecimiento en el T1. Se evaluó la ETc en el T1 ya que fue el tratamiento con bienestar hídrico durante todo el ciclo, por lo que no sufrió limitantes de agua para expresar su potencial de evapotranspiración. Asimismo cabe mencionar que se realizó solo en el T1 debido que para el cálculo de la ETc bajo condiciones de estrés se debería utilizar factores de corrección que aún no se encuentran disponibles localmente.

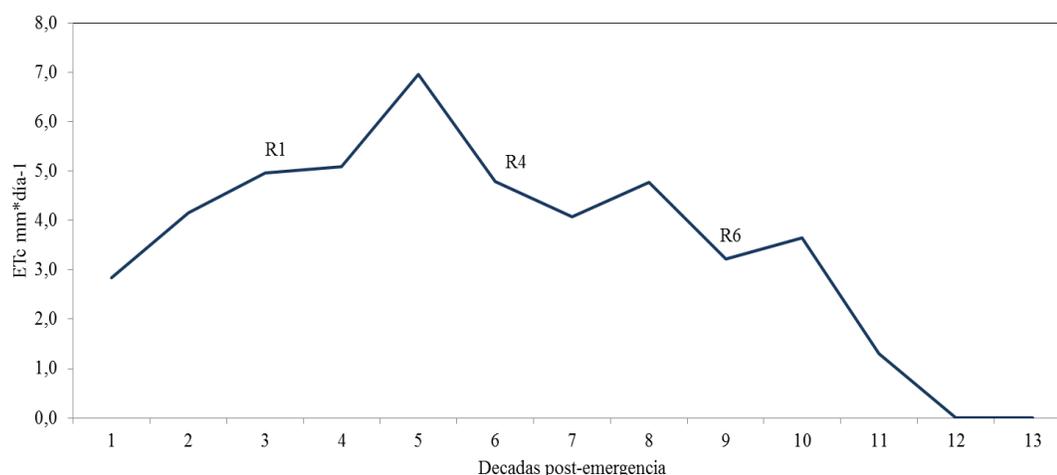


Figura 15. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ETc) diaria (mm día⁻¹) según década post-emergencia.

En la Figura 15 se puede observar un incremento en la ETc desde la emergencia hasta R1 para luego alcanzar un valor máximo. Esta intensificación se da a medida que aumenta el área foliar dado que crece linealmente el consumo de agua del cultivo para una misma demanda atmosférica, hasta interceptar el 95 % de la radiación fotosintéticamente activa (Gerster y Bacigaluppo, 2009). El incremento de la ETc también es consecuencia de las mayores demandas atmosférica del mes de enero en el cual se ubicó esta fase del cultivo.

A partir del máximo valor de ETc se constató una tendencia decreciente, una primera fase en forma muy pronunciada hasta R4 como consecuencia de los elevados eventos de PP ocurridas en esta etapa que provocaron la disminución de la demanda atmosférica y el consumo de agua. Se observa en la Figura 15 una segunda etapa con una caída menos pronunciada durante el PC correspondiente al mes de febrero donde se registraron las PP mayores en el ciclo del cultivo. En la última fase del cultivo ocurrieron las menores ETc como consecuencia de la madurez en ésta etapa la evapotranspiración se hace mínima por la senescencia foliar.

Entre los estadios R4 y R6 la ETc fue de 124 mm representando el 27 % de la ETc total. Un resultado similar fue obtenido por Grasso y Montero (2011) quienes reportaron una ETc de 144 mm durante el PC siendo ésta el 33 % de la ETc total. Los valores de ETc obtenidos fueron inferiores a los evaluados por Karam et al. (2005), los que reportaron que el 65 % de la ETc de la soja ocurre entre los estadios R3 a R5, mostrando la mayor sensibilidad durante este período. Esta baja ETc durante el PC está explicada por los eventos climáticos ocurridos durante el mismo. Este comportamiento justificó las menores TCC durante el PC con respecto a los valores citados anteriormente (Grasso y Montero 2011, Canosa y Prieto 2013) que luego se tradujeron en menores rendimientos.

La ETc diaria máxima lograda en el presente ensayo fue de 7 mm día⁻¹, la misma ocurrió entre las etapas R1 a R4, el comportamiento coincide con lo presentado por Reicosky y Heatherly, citados por Della Maggiora et al. (2000), donde la ETc se incrementó desde V3 hasta V6 y presentó los máximos valores entre R1 y R6, los cuales fueron de 7,6 mm día⁻¹.

La ETc promedio obtenida fue de 3,6 mm día⁻¹ estimándose una demanda total de agua de 458 mm, coincidente con los datos presentados por Reicosky y Heatherly, citados por Della Maggiora et al. (2000), obteniendo una media estacional de 4 mm día⁻¹, presentando un ciclo de 117 días, con un consumo total de 454 mm.

Como se puede observar en el Cuadro 5 en diferentes experimentos para la misma zona, surgieron datos similares a Grasso y Montero (2011) no así Canosa y Prieto (2013), Giménez (2014) quienes obtuvieron mayores registros de ETc durante el ciclo y lograron un rendimiento mayor, claramente se observó una relación entre la ETc total durante el ciclo del cultivo y el rendimiento logrado.

Cuadro 5. Resultados comparativos entre años para una misma localidad

	Grasso y Montero (2011)	Canosa y Prieto (2013)	Giménez (2014)	Ensayo 2013-14
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	4872	6192	7275	4611
ETc total (mm)	435	548	608	458
EUA (kg mm ⁻¹)	11,2	11,3	12	10,1

Estas diferencias entre ensayos tienen un gran componente ambiental, teniendo en consideración que estos valores se tratan del tratamiento con bienestar hídrico donde en ninguno de los casos presentaron deficiencias hídricas, por lo tanto la ETc dependió exclusivamente de la demanda atmosférica (RS, temperaturas, velocidad del viento y porcentaje de humedad relativa). Como se mencionó anteriormente la RS fue el factor de mayor variación entre los ensayos, lo que justificó estos valores de ETc. En el caso de Canosa y Prieto (2013), Giménez (2014), la RS fue un 20 y 27 % superior respectivamente a las registradas en el presente ensayo lo que tuvo como resultado una mayor ETc durante el cultivo, siendo ésta un 16 y 25 % superior respectivamente. Este incremento en la ETc se tradujo en rendimientos 26 y 37 % superiores al ensayo analizado actualmente.

El efecto es más significativo si ocurre durante el PC como lo menciona Giménez (2010), dado que las TCC durante esta etapa establecen las condiciones para fijar el número de granos por m² que es el componente principal de rendimiento en grano. Esto coincide con los datos reportados por Giménez (2014) de 7,3 mm día⁻¹ de ETc promedio en el PC, Canosa y Prieto (2013) 6,4 mm día⁻¹, Grasso y Montero (2011) 4,4 mm día⁻¹ y en el presente ensayo 3,9 mm día⁻¹. Este comportamiento de la ETc durante el PC explicó las diferencias en el rendimiento entre los ensayos. Si bien la ETc total del presente ensayo fue mayor que Grasso y Montero (2011), durante el PC se obtuvieron menores valores, lo que determinó que el rendimiento de este último sea superior en un 6 %, ambos parámetros determinaron que la EUA fuera 1,1 kg mm⁻¹ mayor al ensayo 2014.

La EUA fue de 10 kg mm⁻¹ en este ensayo, siendo menor a la reportada por Grasso y Montero (2011), la misma está determinada por una mayor ETc total (en un 5 %) y un menor rendimiento (en un 5,4 %) con respecto a estos autores. Canosa y Prieto (2013) obtuvieron valores superiores con respecto al presente ensayo en relación a la ETc en un 16 % y al rendimiento en un 26 %. Del mismo modo Giménez (2014) obtuvo una ETc 25 % y un rendimiento 37 % superior con respecto al ensayo 2014, determinando así una mayor EUA de ambos trabajos, como se observa en el Cuadro 5. Hattendorf et al., citados por Micucci (2004) señalan que debido a la dependencia de la EUA de las condiciones climáticas y el manejo del cultivo, el rango de la misma es amplio, y para cultivos sin limitantes de disponibilidad hídrica propone un rango que

varía entre 5 y 11 kg mm⁻¹ evapotranspirado. En experimentos realizados por Vilches y Costanzo (2011) obtuvieron una EUA de 8,8 kg mm⁻¹, los mismos autores citando a Della Maggiora et al., en Balcarce, obtuvieron una EUA de 9,1 kg mm⁻¹ mientras que Weir et al., citados por Vilches y Costanzo (2011), en Marcos Juárez, sin limitantes hídricas, midieron un consumo potencial de 630 mm y una EUA de 6,3 kg mm⁻¹.

Se puede afirmar con estos resultados que la EUA como la ETc son características variables dependientes de las condiciones climáticas, manejo del cultivo, disponibilidad hídrica y material genético utilizado.

4.1.8. Respuesta al riego

En la Figura 16 se observa la relación entre el número de granos por m² con los mm recibidos (lluvia y riego) para cada tratamiento durante todo el ciclo. Se puede ver que el número de granos por m² se incrementó con el aumento de los mm de agua recibidos, como lo mencionan Rodríguez et al. (s.f.).

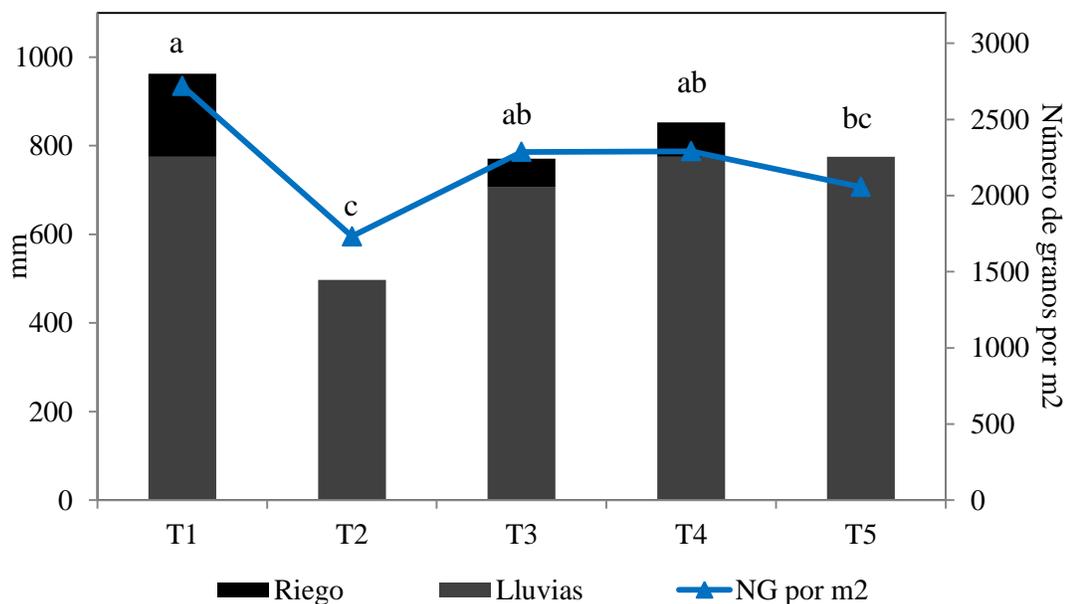


Figura 16. Relación entre número de granos por m² y milímetros recibidos (PP total y riego) por cada tratamiento. Puntos con igual letra no difieren entre sí ($p < 0,05$; Tukey).

De esta forma se observó que el T1 fue el tratamiento que presentó una mayor disponibilidad hídrica durante el ciclo (se contabiliza PP total), y fue el tratamiento donde se obtuvo un mayor número de granos por m². Estos resultados coinciden con lo mencionado anteriormente donde éste tratamiento logró el mayor rendimiento, así como el T2 es el tratamiento que presentó el rendimiento más bajo y concuerda con la menor disponibilidad hídrica, por lo tanto el número de granos fue menor que el resto. La

concordancia entre los rendimientos y los mm recibidos también se pudo observar en el T3 y el T4 en el cual los dos tratamientos presentaron similares disponibilidades hídricas durante el ciclo y esto se tradujo en rendimientos que no difirieron estadísticamente.

La disponibilidad hídrica total durante el cultivo por sí sola no justificó los resultados por más que existió una alta correlación entre estas y el número de granos por m^2 , coincidiendo con García y Ferrarotto (2009), es de suma importancia saber en qué etapa del cultivo la disponibilidad hídrica fue elevada. Como ya se indicó todos los tratamientos tuvieron bienestar hídrico en el PC, por lo que tendrían que haber obtenido rendimientos similares, de acuerdo a Andrade et al. (2000a), Andriani (2002), Karam et al. (2005). Esto no fue así, ya que el T2 obtuvo 1591 kg ha^{-1} menos en rendimiento que el T1, esto se debió a las deficiencias hídricas provocadas en las etapas vegetativas y floración las cuales fueron más extremas (menor al 20 % de AD) que las reportadas en la bibliografía (entre 20 y 40 % de AD, Andriani, 2002). Esto se tradujo en una menor acumulación de MS a inicios del PC, y si bien la TCC no difirió significativamente con el resto de los tratamientos, la misma no fue suficiente para compensar la baja acumulación de MS en el PC, por lo cual no pudo recuperar esta pérdida de rendimiento.

En cuanto a las otras estrategias de riego evaluadas, no existieron diferencias en relación al rendimiento ya que sus deficiencias no fueron tan prolongadas ni tan severas, como las ocurridas en el T2. Por esta razón el T1, el T3 y el T4 obtuvieron mayor acumulación de MS y un mayor número granos por m^2 .

Por lo que se puede concluir que deficiencias hídricas moderadas, durante la etapa vegetativa no afectaron significativamente el rendimiento, en cambio contenidos hídricos del suelo inferiores al 20 % del AD durante la fase vegetativa y la floración sí afectaron significativamente el rendimiento. Por esta razón, no solo son importantes las etapas en las cuales ocurren las deficiencias hídricas, sino también la magnitud de las mismas.

5. CONCLUSIONES

El bienestar hídrico durante el ciclo de soja no aseguró la concreción del potencial de rendimiento, debido a las limitaciones en la RS ocurridas, dicho tratamiento presentó una disminución del rendimiento que varió entre 1600 y 2600 kg ha⁻¹ aproximadamente, con respecto a los rendimientos alcanzados en ensayos anteriores en los que se estudió la misma temática. Por lo cual se constató que las variaciones en la RS provocaron modificaciones importantes en el rendimiento de soja.

Se destaca que las deficiencias hídricas intensas (con contenidos hídricos del suelo menores al 20 % de AD) en las fases vegetativas y en la floración redujeron significativamente los rendimientos (35 %). En esta situación aunque existió bienestar hídrico durante el PC, no se expresaron los factores de compensación de rendimiento característicos de la especie, dado que la limitante principal durante esta fase del cultivo fue la RS. Por lo tanto, la combinación de ambos sucesos afectó la concreción de rendimiento.

El tratamiento con deficiencias hídricas durante la fase vegetativa y la floración registró una menor acumulación de MS en el PC con respecto al de bienestar hídrico, lo que se tradujo en un menor número de granos por m² afectando así el rendimiento, ya que éste es el principal componente del mismo.

En relación al riego deficitario controlado no fue posible obtener resultados concluyentes dado que en gran parte del ciclo no se pudo aplicar adecuadamente la tecnología por las abundantes PP ocurridas en la temporada. Por lo tanto, no se encontraron diferencias con el tratamiento de bienestar hídrico, dada la similitud en el contenido de AD del suelo durante el ciclo.

En el presente trabajo se concluyó que disponer de bienestar hídrico a partir del inicio de la fase reproductiva permitió concretar los mayores rendimientos. A su vez, las deficiencias hídricas intensas en la fase de floración afectaron significativamente los mismos. Por lo cual, para una correcta planificación del riego suplementario en soja no solo se debe considerar la etapa de desarrollo en que ocurren las deficiencias hídricas, sino también la intensidad de las mismas.

6. RESUMEN

Se desarrolló un experimento de soja (*Glycine max*, L.) en la Estación Experimental “Dr. M. A. Cassinoni” situada en Paysandú, Uruguay, en el verano 2013-14. El ensayo consistió en provocar deficiencias hídricas en diferentes etapas del ciclo del cultivo y determinar las pérdidas en el rendimiento y en sus componentes, así como en la producción de MS y TCC. Se evaluaron 5 tratamientos de acuerdo al AD del suelo en distintas etapas del ciclo del cultivo, los mismos fueron: T1= Bienestar hídrico en todo el ciclo, T2= Bienestar hídrico en PC y deficiencias hídricas en ENC, T3= Bienestar hídrico en PC y floración y deficiencias hídricas en ENC, T4= Riego deficitario controlado, T5= Secano. Las deficiencias se generaron por intercepción de las PP a través de la utilización de simuladores de sequía y el bienestar hídrico se logró con riego suplementario. El tratamiento con bienestar hídrico en todo el ciclo tuvo un rendimiento de $4,6 \text{ t ha}^{-1}$, las deficiencias hídricas provocadas en la fase vegetativa y en la floración redujeron un 35 % el rendimiento obtenido, mientras que deficiencias hídricas en la fase vegetativa tuvo una pérdida de rendimiento del 15 %, el tratamiento con riego deficitario controlado no presentó diferencias con el T1, no obstante fue un año con lluvias por encima de la media histórica en todo el ciclo del cultivo. En cuanto al número de granos por m^2 se encontraron diferencias significativas lo que explicó las diferencias en el rendimiento, sin embargo no se encontraron diferencias para el peso de mil granos. La acumulación de MS mostró diferencias significativas en R4, no así en R6. La TCC entre R4 y R6 fue similar entre tratamientos teniendo la misma un promedio de $94 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, este bajo crecimiento durante el PC del cultivo pone de manifiesto las características particulares del año en el que se desarrolló el experimento, con una RS por debajo de la media histórica y PP por encima de la misma, por lo cual no se alcanzaron rendimientos potenciales al verse afectados los componentes del mismo. Los resultados indican que deficiencias hídricas en la fase vegetativa y en la floración produjeron reducciones significativas en el rendimiento, además se destacó que la RS incidente afectó la concreción del rendimiento en el cultivo de soja.

Palabras clave: *Glycine max*; Deficiencias hídricas; Riego deficitario; Radiación solar incidente; Rendimiento; Período crítico.

7. SUMMARY

An experiment of soybean developed (*Glycine max*, L.) at the Experimental Station “Dr. Mario A. Cassinoni” located at Paysandú, Uruguay, in the summer 2013-14. The trial was to cause water deficiencies at different stages of the crop cycle and identify the losses in yield and its components, as well as in the dry matter production and crop growth rate. Five treatments according to available soil water at different stages of the crop cycle were evaluated, these were: T1= welfare water throughout the cycle, T2= welfare water in the critical period and water deficiencies in non-critical stages, T3= welfare water in the critical period and flowering and water deficiencies in non-critical stages, T4= deficit irrigation, T5= dry. The deficiencies were generated by interception of rainfall through the use of simulators drought and welfare water was achieved with supplemental irrigation. Welfare water treatment throughout the cycle had a yield of 4,6 t ha⁻¹, the water deficiencies caused in the vegetative phase and in bloom reduced by 35 % the yield, while water deficiencies in the vegetative phase had a loss of yield of 15 %, treatment whit deficit irrigation not show differences with the T1, however it was a year with rainfall above the historical average throughout the crop cycle. As the number of grains per m² significant differences were found which explained the differences in performance, no clutch no differences were found for the thousand kernel weight. The dry matter accumulation showed significant differences in R4, not so in R6. The crop growth rate between R4 and R6 were similar among treatments have the same average of 94 kg ha⁻¹ day⁻¹, this low growth during the critical period highlight the particular characteristic of the year in which the trial was conducted, a solar radiation below the historical average and rainfall above the same, therefore no potential yield were achieved to be affected the components thereof. The result indicates that water deficiencies in vegetative and flowering phase produced significant reductions in performance. It was also noted that the solar radiation incident affected the concretion of yield in soybean.

Keywords: *Glycine max*; Water deficiencies; Deficit irrigation; Solar radiation incident; Yield; Critical period.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo; guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, FAO. 304 p. (Estudio FAO Riego y Drenaje no. 56).
2. Andrade, F. H.; Aguirrezabal, L.; Rizzalli, R. 2000a. Crecimiento y rendimiento comparado. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.
3. _____.; Sadras, V. O. 2000b. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
4. Andriani, J. M. 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 13: 27-30.
5. _____., 2002. Estrés hídrico en soja. IDIA XXI. 2 (3): 48-51.
6. Bidegain, S. A. 2012. Cuantificación de la respuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 34 p.
7. Bodrero, M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. In: Jornada Nacional de la Soja (2003, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1- 13 (Actividades de Difusión no. 325).
8. Buyatti, L.; Sosa, M.; Parra, R. 2006. Evaluación de materia seca de biomasa aérea total de soja, según fecha de siembra y grupo de madurez, en los estadios fenológicos R5 y R6. (en línea). Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias/INTA - EEA Reconquista. 4 p. Consultado 11 nov. 2014. Disponible en https://www.google.com.uy/search?q=Evaluaci%C3%B3n+de+materia+seca+de+biomasa+a%C3%A9rea+total+de+soja%2C+seg%C3%BAn+fecha+de+siembra+y+grupo+de+madurez%2C+en+los+estadios+fenol%C3%B3gicos+R5+y+R6.&rlz=1C1NNVC_enUY568UY568&oq=Evaluaci%C3%B3n+de+

[materia+seca+de+biomasa+a%C3%A9rea+total+de+soja%2C+seg%C3%BA n+fecha+de+siembra+y+grupo+de+madurez%2C+en+los+estadios+fenol%C 3%B3gicos+R5+y+R6.&aqs=chrome..69i57.1172248j0j4&sourceid=chrome &es_sm=93&ie=UTF-8](http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/05-Agrarias/2006-A-008.pdf)

9. Calviño, P. A.; Sadras, V. O. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crop Research*. 63: 237-246.
10. Carballo de Silva, L. 1990. Manejo del riego en soya sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. *Agronomía Tropical (Venezuela)*. 40: 35-56.
11. Currié H.; Iván, E.; Caseres, S. L. 2006. Análisis de la oferta de agua y el uso consuntivo para los cultivos de soja y girasol en el área de influencia de La Tigra, Chaco. (en línea). Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. 4 p. Consultado 27 set. 2014. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/05-Agrarias/2006-A-008.pdf>
12. Dardanelli, J. L.; Collino, D.; Otegui, M. E.; Sadras, V. O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; de La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos; bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina, Facultad de Agronomía. pp. 377-406.
13. _____; Suero, E. E.; Andrade, F. H.; Andriani, J. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie*. 11: 747-756.
14. Della Maggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I. 2000. Requerimientos hídricos. *In*: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.
15. Ernst, O.; Siri-Prieto, G. 2011. La agricultura en Uruguay; su trayectoria y consecuencias. *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (2º, 2011 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 149-163.

16. Farias, J. R.; Nepomuceno, A. L.; Neumaier, N. 2007. Ecofisiología da soja. Circular Técnica. Embrapa. 48: 1-9.
17. Fehr, W. R.; Caviness, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special report no. 80. pp. 929-931.
18. Frederick, J. R.; Bauer, P. J.; Camp, C. 2001. Drought-stress effects on branch and mainstem seed yield and yield components of determinate soybean. *Crop Science*. 41: 759-763.
19. García, F. O. 2009. Introducción; marco de referencia del Simposio. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 3-5.
20. García, H.; Ferrarotto, M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soja (Glicine Max) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (en línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. pp. 21-27. Consultado 18 set. 2014. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108
21. García, M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. In: Seminario Internacional Riego en cultivos y pasturas (2°, 2012 Salto, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 23-31.
22. García Préchac, F.; Durán, A.; Califra, A.; Hill, M. s.f. Propiedades hídricas de los suelos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
23. García y García, A.; Persson, T.; Guerra, L.; Hoogenboom, G. 2010. Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern. *Agricultural Water Management*. 97: 981-987.
24. Gerster, G.; Bacigaluppo, S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 42: 63-67.
25. Giménez, L.; Böcking, B.; Garcia Petillo, M.; Garcia, C.; Sawchik, J. 2010. Prologo; marco de referencia del seminario. In: Seminario Internacional Riego en Cultivos y Pasturas (1°, 2010 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 3-4.

26. _____.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15(2): 100-108.
27. _____. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?. *In*: Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas (2°, 2012 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. pp. 33-41.
28. _____. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia* (Montevideo). 18 (1): 53-64.
29. Grasso, J. P.; Montero, J. A. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.
30. Kantolic, G.; Giménez, P. I.; De La Fuente, E. B. 2003a. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina, Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
31. _____. 2003b. Ecofisiología del cultivo de soja; bases para el manejo y para el aumento del rendimiento potencial. *In*: Reunión de Actualización en Soja (2°, 2003, Criadero Don Mario). Trabajos presentados. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. Cátedra de Cultivos Industriales. Departamento de Producción Vegetal. p. irr.
32. Karam, R. M.; Sfeir, F.; Mounzer, O.; Rouphael, Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 75: 226-244.
33. Lersten, N. R.; Carlson, J. B. 2004. Vegetative morphology. *Agronomy Monograph*. 16: 15-57.
34. López, R.; Fabeiro, C. 2005. Riego deficitario controlado. *In*: Martín de Santa, F.; López, P.; Calera, A. eds. Agua y agronomía. Madrid, España, Mundi-Prensa. pp. 407-432.

35. MDN. DNM (Ministerio de Defensa Nacional. Dirección Nacional de Meteorología, UY). 2014. El verano 2014. (en línea). Montevideo. 4 p. Consultado 15 nov. 2014. Disponible en <http://meteorologia.gub.uy/reportes/dcd/verano.pdf>
36. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2014. Encuesta agrícola “invierno 2014”. (en línea). Montevideo. 3 p. Consultado 15 nov. 2014. Disponible en [file:///C:/Users/hp/Downloads/COMUNICADO+Prensa+AGRICOLA+INVI ERNO+2014+\(Final+Editado\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/COMUNICADO+Prensa+AGRICOLA+INVI ERNO+2014+(Final+Editado).pdf)
37. Micucci, F. 2004. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua en los cultivos extensivos de la región pampeana argentina. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 4 p.
38. Modali, H. 2004. Dry matter accumulation by the start of seed filling as a criterion for yield optimization in soybean. *Agronomy Journal*. 88: 123-131.
39. Molfino, J. H.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay: segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.
40. Mondino, M.; Gómez, D. 2006. Evolución de la intercepción de la radiación incidente y la producción de biomasa en soja de siembras extratempranas a diferentes espaciamientos. Entre Ríos, Argentina, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Sección Ecofisiología y Climatología. pp. 83-86.
41. Musick, J. T.; New, L. L.; Dusek, D. A. 1976. Soil water depletion- Relationships of irrigated sorghum, wheat, and soybeans. *Transactions of the ASAE*. 19 (3): 489-493.
42. Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L.; Farias, J. R. B.; Oya, T. 2000. Estadios de desenvolvimento da cultura da soja. In: Bonato, E. ed. *Estresses em soja*. Passo Fundo, EMBRAPA Trigo. pp. 21-34.
43. Otegui, M. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. *Manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano*. *Informaciones Agronómicas*. no. 44: 16-20.
44. Rodríguez, H.; Dardanelli, J.; De Battista, J.; Castellá, M.; Chaix, X.; Rochás, M.; Burgos, G. s.f. Evaluación de respuesta en rendimiento al riego

- suplementario en soja sobre un suelo Vertisol. Entre Ríos, INTA EEA Concepción del Uruguay. pp. 1-5.
45. Rosadi, R. A.; Afandi, S.; Senge, M.; Ito, K. 2005. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) under deficit irrigation. *Paddy Water Environment*. 3: 219-223.
 46. _____.; _____.; _____.; _____. 2007. The effect of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (*Glycine max* [L.] Merr.). *Paddy Water Environment*. 5: 163-169.
 47. Sadras, V. O.; Ferreiro, M.; Gutheim, F.; Kantolic, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.
 48. Salinas, A. R.; Zelener, N.; Craviotto, R. M.; Bisaro, V. 1996. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica en el suelo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. 31 (5): 331-338.
 49. Salvagioti, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. Santa Fé, INTA. 2 p.
 50. Santos, D. J. 2009. Tolerancia al déficit hídrico, fijación biológica de nitrógeno y algunos mecanismos que los relacionan en soja. Paraná, INTA. Estación Experimental Agropecuaria Paraná. 7 p.
 51. Toledo, R. 2013. Soja; su ecofisiología y manejo. (en línea). Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrarias. 31 p. Consultado 11 nov. 2014. Disponible en <http://www.buscagro.com/www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Soja-su-ecofisiologia-y-manejo.pdf>
 52. Vernetti, F. 2002. Competição de cultivares de soja sob dois sistemas de irrigação em planossolo. Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento no. 2: 1-15.
 53. Vilches, M. S.; Costanzo, M. 2011. Consumo hídrico del cultivo de soja (*Glicine max*, Merrill) en Zavalla, Santa Fé. (en línea). *Revista Agromensajes*. 31 (6):

s.p. Consultado 14 nov. 2014. Disponible en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/31/2AM31.htm>

54. Vivan, G.; Peiter, M.; Días Robaina, A.; Da Silva, F.; Buske, T. 2013. Rendimiento relativo da cultura da soja em função da lamina de irrigação. Irriga (Botucatu). 18 (2): 282-292.
55. Zampedri, S. M.; Currie, H. M. 2000. Impacto del riego complementario en los rendimientos del cultivo de la soja en el centro sur de la Provincia de Corrientes. In: Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas (7ª., 2000, Corrientes, AR). Trabajos presentados. Corrientes, AR, Universidad Nacional del Nordeste (Corrientes). Facultad de Ciencias Agrarias. Cátedra Hidrología Agrícola. pp. 1-3.