

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS DEFICIENCIAS
HÍDRICAS SOBRE EL RENDIMIENTO DE SOJA

por

Gastón CANOSA
Claudio PRIETO

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2013

Tesis aprobada por:

Director:

.....
Ing. Agr. Luis Giménez

.....
Ing. Agr. Mario García

.....
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Fecha : 22 de marzo de 2013

Autor:

.....
Gastón Canosa

.....
Claudio Prieto

AGRADECIMIENTOS

A Mamá por el apoyo incondicional durante toda la carrera, y por el aliento cuando el aire faltaba. Al maravilloso “502” por todas las experiencias y la amistad que nunca se termina. A Martín, Nachito, Seba, y todos los amigos de Facultad que estuvieron a lo largo de estos años. A la barra de “jumanji”. Y a Luis y Richard por la confianza, el apoyo, la dedicación y el esmero para estar en todos los detalles.

Gastón.

A mi familia, la cual es y será el pilar fundamental de mi vida; a todos nuestros compañeros y muy especialmente a la generación EEMAC 2011 y amigos que de una u otra forma formaron parte de esto.

Claudio.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCION</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. <u>LA SOJA EN EL URUGUAY</u>	3
2.1.1. <u>Localización geográfica, área sembrada y rendimientos del cultivo</u>	3
2.2. <u>CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DEL URUGUAY PARA LA PRODUCCIÓN DE SOJA</u>	4
2.2.1. <u>Radiación solar-Heliofanía real</u>	4
2.2.2. <u>Temperatura del aire</u>	5
2.2.3. <u>Precipitaciones</u>	6
2.2.4. <u>Evapotranspiración</u>	8
2.2.5. <u>Características principales de los suelos</u>	8
2.3. <u>LIMITANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY</u>	9
2.4. <u>IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO DE SOJA</u>	10
2.4.1. <u>Potencial productivo</u>	10
2.4.2. <u>Producción materia seca</u>	11
2.4.3. <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u>	12
2.4.4. <u>Deficiencias hídricas y su influencia en la producción</u>	13
2.4.5. <u>Índice de cosecha</u>	17
2.5. <u>ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA</u>	18
2.5.1. <u>Requerimientos diarios de agua</u>	19
2.5.2. <u>Consumo total de agua</u>	20
2.5.3. <u>Eficiencia del uso del agua</u>	21
2.6. <u>RIEGO</u>	21
2.6.1. <u>Manejo de agua de riego</u>	21
2.6.2. <u>Capacidad de almacenamiento de agua disponible</u>	22
2.6.3. <u>Factor de agotamiento del suelo (p)</u>	22
2.6.4. <u>Riego deficitario</u>	24
3. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	26
3.1. <u>LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO</u>	26

3.1.1. <u>Manejo experimental</u>	26
3.1.2. <u>Tratamientos</u>	27
3.1.3. <u>Agua recibida mediante riego y precipitación en los tratamientos</u>	29
3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO.....	29
3.2.1. <u>Hipótesis biológicas</u>	29
3.2.2. <u>Hipótesis estadísticas</u>	29
3.2.3. <u>Diseño experimental</u>	30
3.3. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	31
3.3.1. <u>Determinaciones durante el ciclo del cultivo</u>	31
3.3.2. <u>Determinaciones a cosecha</u>	31
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	32
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	33
4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO.....	33
4.1.1. <u>Precipitaciones</u>	33
4.1.2. <u>Radiación solar incidente</u>	34
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO.....	35
4.2.1. <u>Evolución del agua disponible en el suelo</u>	35
4.2.2. <u>Parámetros de crecimiento</u>	38
4.2.2.1 Evolución de la MS durante el período crítico...	38
4.2.2.2 Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la TCC durante R3-R6.....	40
4.2.3. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento</u>	41
4.2.3.1. Relación entre rendimiento y sus componentes	43
4.2.4. <u>Efecto de la disponibilidad hídrica sobre los componentes del rendimiento</u>	44
4.2.5. <u>Evapotranspiración del cultivo y eficiencia en el uso del agua en el T1</u>	45
5. <u>CONCLUSIONES</u>	47
6. <u>RESUMEN</u>	48
7. <u>SUMMARY</u>	49
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	50
9. <u>ANEXOS</u>	59

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características hidrológicas del suelo.....	26
2. Calendario de eventos fenológicos.....	27
3. Componentes del rendimiento según tratamiento.....	44
4. Índice de cosecha para los tratamientos evaluados.....	46
 Figura No.	
1. Precipitaciones ocurridas durante 2011-12 obtenida en la Estación meteorológica de la EEMAC, Facultad de Agronomía y valores promedio de la serie histórica 1961 a 2009. (En base a datos proporcionados por la Dirección Nacional de Meteorología.....	33
2. Radiación solar ($Mj\ m^{-2}día^{-1}$) ocurrida durante 2011-12 y valores promedio de la serie histórica 2002-12, en base a datos obtenidos en la estación meteorológica de la EEMAC, Facultad de Agronomía.....	34
3. Evolución del AD en el T1. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC, y las líneas rojas indican el umbral de riego para el PC.....	35
4. Evolución del AD en el T1 y T2. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC, y las líneas rojas indican el umbral de riego para el PC.....	36
5. Evolución del AD en el T1 y T3. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC, y las líneas rojas indican el umbral de riego para el PC.....	36
6. Evolución del AD en el T1 y T4. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC, y las líneas rojas indican el umbral de riego para el PC.....	37
7. Evolución de la MS en $Kg\ ha^{-1}$, para los estadios R3, R4 y R6.....	38

8. Tasa de crecimiento del cultivo durante R3-R6 para los tratamientos evaluados.....	40
9. Rendimiento en grano (Kg ha^{-1}) para los tratamientos evaluados.....	41
10. Rendimiento en función del No. de granos. m^{-2} (superior) y el Peso de 1000 granos (inferior)	43
11. Evolución de la ETC diaria (mm día^{-1}) según década post-emergencia.....	45

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en nuestro país tradicionalmente se concentró en el Litoral oeste del Uruguay. Sin embargo, en la actualidad la frontera agrícola se ha expandido como consecuencia del desarrollo de la siembra directa, tecnología que permitió levantar las limitantes que se daban para el laboreo de una amplia gama de suelos (Blum et al., 2008).

Ernst (2004), señala que el sistema agrícola ganadero uruguayo se está haciendo más agrícola, siendo el “fenómeno soja” uno de los principales responsables de este cambio. El crecimiento en la superficie de siembra de soja ocurre principalmente en la región agrícola tradicional, asimismo en zonas agrícolas no tradicionales como el centro, y la región noreste del país la superficie sembrada de soja crece. El área de siembra del cultivo aumentó de 12.000 ha en la zafra 2000-01 a una intención de siembra de 883.700 ha en la zafra 2011-12 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

Para las condiciones del Uruguay, con un régimen de precipitaciones (PP) que no permite un suministro de agua constante al cultivo (Corsi, 1994), sumado a una baja capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) de los suelos (Sawchik y Cereta, 2005), se generan habitualmente condiciones de deficiencias hídricas durante el crecimiento y desarrollo del cultivo de soja que son limitantes para la obtención de rendimientos potenciales y estables (Giménez y García, 2011).

La bibliografía reporta que el crecimiento de los cultivos y en particular la soja, se reduce cuando el contenido hídrico del suelo disminuye por debajo del 50 % del agua útil (Andrade et al., 2000a), provocando esto caídas en el rendimiento a pesar de la alta plasticidad que presenta en los estadios vegetativos, la cual se reduce durante las etapas reproductivas. El período crítico (PC) de la soja se extiende desde R4 (Fehr y Caviness, 1977) hasta R6, período donde se fija el número de vainas (Andriani, 2002), y en el cual la ocurrencia de cualquier tipo de estrés reducirá el rendimiento más que en otras etapas de desarrollo (Baigorri et al., 2000).

El riego suplementario puede ser una excelente estrategia para aumentar los rendimientos y mejorar la estabilidad de los mismos, pero para esto es fundamental conocer la cantidad total de agua que consume el cultivo, los requerimientos diarios y como varían estos en las distintas etapas de desarrollo, así como la fracción de agua que puede ser agotada en la zona radicular antes de que se presente un estrés hídrico.

A pesar de esto, el riego no se ha extendido masivamente en la agricultura extensiva. Entre las principales causas pueden encontrarse la presencia de años sin necesidad de riego, altos costos de inversión y dificultad en la puesta en práctica de los sistemas de riego. Esto último porque no existe capacidad de gestión para llevar adelante la implementación del riego a nivel predial, ya sea por parte de productores, técnicos y operarios (Jiménez de Arechaga, 2007).

La soja a nivel nacional se realiza mayoritariamente en seco, la información sobre estrategias de riego suplementario y evaluación de disponibilidades hídricas en distintas etapas del cultivo, es escasa. Por estas razones, se plantea como objetivo principal de este trabajo generar información, sobre el rendimiento de soja sin deficiencias hídricas en todo el ciclo y el efecto de las deficiencias hídricas sobre la productividad del cultivo en distintas etapas fenológicas.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. LA SOJA EN EL URUGUAY

2.1.1. Localización geográfica, área sembrada y rendimientos del cultivo

La agricultura extensiva de secano en Uruguay se concentra en la región Litoral oeste, abarcando principalmente los departamentos de Colonia, Soriano, Río Negro y Paysandú. Estos departamentos constituyen la zona agrícola tradicional del Uruguay. Esta es la zona de agricultura extensiva por excelencia desde hace más de 50 años, luego del desplazamiento desde la zona sur (Canelones y alrededores de Montevideo). Asimismo, los cultivos se han propagado a otras regiones del país generando esto una expansión de la frontera agrícola propiciada sobre todo por la generalización de la tecnología de siembra directa, que permitió avanzar sobre suelos que antes no eran aptos para el laboreo. Tal es el caso de las regiones centro (Durazno), noreste (Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo) y sur (San José) del país, resultando en conjunto estos departamentos en el área agrícola no tradicional del Uruguay (Blum et al., 2008).

En la actualidad, la zona tradicional concentra más del 65% del área de cultivos de verano, que junto a los departamentos de Flores, Durazno, San José y Florida llegan al 88% del área (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

Según Arbeletche et al. (2008), a partir del año 2000 se da una gran expansión de la superficie de siembra de soja lo que ha determinado grandes cambios en el sector agrícola uruguayo. Este crecimiento se da especialmente en el área tradicional de siembra, y otra parte de este incremento ocurre en zonas agrícolas no tradicionales como el centro y la región noreste del país. Respecto a esto se debe señalar que se pasó de sembrar 12.000 ha en la zafra 2000-01 a una intención de siembra 883.700 ha en la zafra 2010-11 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

En la zafra 2011-12 según la encuesta agrícola primavera-verano 2012, la siembra de soja fue de 883.700 ha, lo que se ubica en un nivel similar al de la zafra anterior y mantiene su predominancia dentro de los cultivos de verano, representando aproximadamente el 80 % del área de cultivos de verano (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

Con respecto a la productividad de la actividad, se observa un estancamiento en el rendimiento, el que no se ha modificado significativamente durante los últimos 10 años manteniéndose en el entorno de 1,9 t ha⁻¹. Con un

máximo de 2,39 t ha⁻¹ en la zafra 2011-12 y un mínimo de 1,5 t ha⁻¹ en 2003-04 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2013).

Por lo tanto, se concluye que la producción de soja en el país se ha incrementado en los últimos años como consecuencia de un aumento en el área sembrada, pasando de 27.600 t en el 2000-01 a 2.112.200 t en la zafra 2011-12 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011), y no por un aumento en el rendimiento.

2.2 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DEL URUGUAY PARA LA PRODUCCIÓN DE SOJA

El clima del Uruguay está definido por su ubicación geográfica en el continente (30 y 35° de LS), su posición con relación al océano Atlántico, el relieve de su territorio y zonas circundantes, así como la circulación atmosférica regional, se ubica en una zona subtropical templada típica (Durán et al., 1999)

Es importante determinar las características climáticas del ambiente de producción de los cultivos, debido a que las mismas son las que determinan el potencial alcanzable del cultivo. Con respecto a esto, la radiación solar, la temperatura del ambiente y el agua son las principales variables agrometeorológicas que regulan los procesos metabólicos de las plantas (Cárcova et al., citados por Gerster et al., 2009).

2.2.1. Radiación solar-Heliofanía real

En verano, cuando nos acercamos al solsticio de verano (21 de diciembre) los días se van alargando. En el extremo norte del territorio, la duración del día más largo del año es de 14 h 04 m. Por otra parte en el sur, la duración es un poco mayor, llegando a un valor de 14 h 31m (Durán, 1986). De manera que, con adecuada disponibilidad de agua y nutrientes, la capacidad de acumular biomasa será función de la intercepción máxima de radiación durante estos períodos de máxima heliofanía (Melgar et al., 2011).

La soja florece cuando la duración del día comienza a acortarse, esto permite establecer para aquellos cultivares con respuesta fotoperiódica, que el pasaje del estado vegetativo a reproductivo ocurre a fines de diciembre. A pesar de que la temperatura ejerce una considerable influencia en la floración de la soja y también interacciona con el fotoperíodo, es éste último el factor de mayor importancia para determinar la inducción floral (Melgar et al., 2011). Sin embargo, se debe aclarar que en materiales de ciclo corto es la temperatura el

factor más determinante en el pasaje de estado vegetativo a reproductivo, floreciendo independientemente del fotoperíodo¹.

Según Ceretta y Mandl (2002), es de esperar que en nuestras condiciones la soja induzca la floración después del 21 de diciembre, cuando los días comienzan a acortarse. Esto se debe a que la mayoría de los grupos de madurez (GM) utilizados son intermedios a largos (pertenecientes a los grupos V, VI y VII) los cuales inducen la floración cuando las horas de luz son inferiores a 14 horas aproximadamente, existiendo variaciones entre cultivares. Por otra parte se debe mencionar que los cultivares más precoces tienen un umbral de fotoperíodo mayor que los de ciclo más largo. En trabajos posteriores se indica que los GM III, IV y V pueden definirse como GM cortos, para las condiciones de Uruguay, ya que florecen con los días alargándose previo al 21 del diciembre (Giménez, 2007)

2.2.2. Temperatura del aire

Según URUGUAY. MDN. DNM (2011), en primavera la temperatura media es del orden de 16.9 °C. Estas oscilan entre los 18.7 °C en la zona norte y 15.1°C para el este, con máximos de hasta 25°C para la zona de Artigas y valores mínimos de 9.8 °C para la zona de Rocha.

En verano se dan las máximas temperaturas del año, con una media de 23.1 °C, representando esto un aumento de 6 °C respecto a la media de la primavera. Los máximos valores se dan al norte con 24.7 °C en la zona de Artigas y Salto oscilando en sentido descendente, hasta valores mínimos de 21.3 °C hacia el sureste del país.

La temperatura junto al fotoperíodo regulan la duración de las fases de desarrollo del cultivo de soja (Kantolic et al., 2003). 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 es menor (Piper et al., citados por Kantolic et al., 2003).

Con respecto a la temperatura, se debe decir que este factor regula el desarrollo durante todo el ciclo, pero los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales que regulan la tasa de desarrollo difieren en las distintas fases (Kantolic et al., 2003). Bote et al., citados por Kantolic et al. (2003), proponen un modelo que se define por una función lineal tri-

¹ Giménez, L. 2013. Com. personal.

segmentada en el que se observan las temperaturas bases (t_b), temperaturas óptimas inferior y superior que definen un rango óptimo (t_o), y temperaturas máximas (t_m), para los períodos emergencia-R1, R1-R5, R5-R7. Las temperaturas óptimas para estos períodos son 30-37 °C, 25-30 °C, y 25-36 °C, respectivamente.

En términos generales se podría decir que en Uruguay no existen limitantes en cuanto a las temperaturas requeridas en las distintas etapas del cultivo, ya que en primavera-verano se encuentran por encima de la temperatura base y por debajo de la máxima, aunque en términos promedios no estén dentro del rango óptimo.

2.2.3. Precipitaciones

De acuerdo a Durán (1986), las PP son una medida indirecta del agua realmente disponible en el suelo, ya que una parte de la lluvia se pierde por escurrimiento superficial, otra se pierde por evaporación directa y finalmente una parte de esta es la que percola hacia la profundidad. De esta forma, el agua de utilidad para las plantas es aquella que se retenga contra la fuerza de la gravedad. Entonces, para caracterizar el régimen hídrico del país, es conveniente analizar en primer término al factor lluvia dado que ésta es la fuente de agua principal.

Las PP mensuales se distribuyen uniformemente a lo largo del año, con un leve incremento en el otoño. La distribución espacial muestra un gradiente decreciente en la transecta noreste (NE)-suroeste (SO), con un valor máximo total anual de 1.400 mm en el NE y un mínimo de aproximadamente 900 mm en el SO del país (Corsi, 1978).

Considerando los valores acumulados de lluvia a través del año, no existe una estación seca ni una estación lluviosa bien definida (Castaño et al., 2010). En este sentido, Durán (1986) ya destacaba que la confiabilidad de las lluvias es bastante reducida debido a la gran irregularidad que presentan en el país, manifestándose situaciones de sequías e inundaciones, las cuales afectan la producción agropecuaria. Más recientemente, Baethgen y Terra (2010) analizando la variabilidad climática del Uruguay en el último siglo, mediante el test de tendencia de Kendall-Mann, concluyen que para la región noroeste (Mercedes, Salto, Rivera) existe una tendencia creciente de las PP anuales en el período 1919-2008 de 4,4 mm año⁻¹. Por otra parte, en el mismo trabajo los autores señalan que para esa zona, la variación de las PP acumuladas de un año a otro, son de hasta más de 300 mm para el período primavera-verano.

La fuente principal de agua para la soja radica en las PP. Por esta razón sus fluctuaciones tanto en cantidad como distribución, originan períodos con deficiencias hídricas, los cuales pueden ser atenuados parcial o totalmente por la reserva hídrica del suelo (Vilche y Costanzo, 2011).

Según la URUGUAY. MDN. DNM (2010), la PP media estacional del verano, calculada a partir de estaciones meteorológicas para una serie de años de 1971 al 2000, es del orden de los 361 mm, estando comprendida entre 453 mm en Artigas y 245 mm en Maldonado. Por otra parte la PP máxima acumulada correspondió a la Estación Meteorológica de Artigas con 1092 mm en el verano 1997-98 y la mínima con 69 mm en la Estación Meteorológica Florida en el año 1978-79.

Para la serie de años comprendida entre 2001 y 2010, la PP media del período estival fue de 380 mm, siendo el verano más lluvioso el de 2009-10, con 662 mm, y el más seco el de 2006-07 con 122 mm en promedio para verano (URUGUAY. MDN. DNM, 2011).

Bidegain (2012), analizando una base de datos conformada por 8 trabajos realizados en la EEMAC entre las zafras 2004-05 y 2010-11, los que resultaron en una serie de 74 situaciones de producción distintas para el cultivo de soja. Se concluye que la variable climática que presenta mayor variación son las PP. Siendo el coeficiente de variación de las PP acumuladas en los períodos: siembra-R3, R3-R6 y R6-R7, de 66, 54 y 77 %, respectivamente. Para el período R3-R6 los máximos obtenidos fueron de 455 mm y los mínimos de 41 mm y una media de 210 mm.

Es importante aclarar que para la planificación del riego y la realización de balances hídricos, es de central importancia en ciertas situaciones tener en cuenta la escorrentía superficial, que aunque sea de difícil determinación, en terrenos con pendiente pronunciada y lluvias intensas, es un término que no se puede despreciar (Pereira et al., 2010). Esto determina que la PP total deba ser corregida, logrando así el término de PP efectiva, que es la que interesa a fines de realizar cualquier balance hídrico. En este sentido Allen et al. (2006), proponen que la cantidad de agua precipitada que se pierde por escurrimiento superficial también depende del tipo de suelo, sus condiciones hidráulicas y el contenido de humedad antecedente, así como el uso de la tierra y el tipo de cobertura. Para situaciones generales, puede asumirse un escurrimiento superficial igual a cero, o el mismo puede ser estimado considerando cierto porcentaje de la PP. Esta consideración es válida cuando se considera el balance de agua en la capa superior del suelo, debido a que la mayoría de los eventos de PP que tengan intensidades o láminas lo suficientemente grandes como para causar escurrimiento superficial, también llevarán el contenido de humedad en

la capa superior del suelo a capacidad de campo. Por lo tanto, se podría ignorar el impacto del componente de escurrimiento superficial. Por otra parte, en general los eventos ligeros de PP no producirán cantidades apreciables de escurrimiento superficial.

2.2.4. Evapotranspiración

Según Castaño et al. (2010), los valores medios de evapotranspiración acumulada anual, estimada por el método de Penman-Monteith, se sitúan entre 1.000 y 1.200 mm, con los menores valores situados al sureste y los máximos al noroeste del país. A su vez, esta presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano (160-185 mm por mes), seguido de la primavera (95-105 mm por mes).

En cuanto al comportamiento histórico, se destaca una baja variabilidad interanual, la cual es un poco más alta durante el verano (Castaño et al., 2010).

2.2.5. Características principales de los suelos

El suelo desde el punto de vista agrícola constituye la principal reserva de agua para el crecimiento de las plantas y es el lugar de almacenamiento, siendo el regulador del ciclo hidrológico a nivel de cultivo.

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

Otra propiedad destacable es la presencia generalizada de horizontes sub-superficiales de textura fina y de carácter iluvial, a escasa profundidad. Esta característica morfológica casi siempre presente, da origen a suelos con un horizonte B argílico, de alto contenido de arcilla y poco permeable (Argiudoles Típicos y Vérticos principalmente).

También se hace frecuente la presencia Vertisoles, suelos de color negro y alto contenido de arcilla expansible en todo el perfil, pero con un contenido de materia orgánica elevado, tanto o más que el de los Molisoles, un rasgo poco frecuente en Vertisoles de otras regiones.

Sadras y Calviño, citados por Barraco et al. (2008), muestran que en distintos ambientes la productividad de los cultivos está relacionada con

las precipitaciones y el agua almacenada en el perfil del suelo que depende, entre otros factores, de la textura de los suelos, de la profundidad efectiva para el desarrollo de raíces y del relieve.

Según Sawchik y Terra (2012), los suelos sobre los cuales se desarrolla el cultivo de soja en nuestro país, son suelos fértiles del tipo Vertisoles y Molisoles.

La capacidad de almacenamiento de agua potencialmente disponible se encuentra entre los 100-170 mm (Sawchik y Terra, 2012), valores similares a los reportados por Hirschy (2006), quien indica que la mayor parte del área del cultivo se desarrolla sobre suelos con una capacidad de almacenaje de agua que cubre un rango entre 80 y 160 mm de agua disponible. Ambos autores están de acuerdo de que esto es una limitante para la expresión del potencial productivo y una fuente importante de variación de rendimiento, ya que esto determina que en los mejores ambientes edáficos, la reserva de agua solo cubra el 30 por ciento de los requerimientos hídricos para la obtención de altos potenciales de rendimientos lo que aunado a una alta frecuencia de períodos estivales secos, ubica esta variable como crítica para el desempeño del cultivo.

2.3. LIMITANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY

De acuerdo con Baigorri, citado por Grasso y Montero (2011), en el Uruguay se pueden sembrar sin limitantes de temperatura, radiación solar y fotoperíodo, los GM III al VIII. Tomando como fechas óptimas de siembra las que se desarrollan durante el mes de noviembre. Los GM más precoces (III y IV) se deben ubicar al sur y los más tardíos (VII y VIII) en el norte del territorio.

La mayor proporción del cultivo de soja se ubica en el Litoral centro y sur del país (Arbeletche et al., 2008). Esta localización geográfica del cultivo está determinada principalmente por las características de los suelos, pero sobre todo por el desarrollo previo en la región en cuanto a infraestructura necesaria, servicios y menores costos de flete, quedando en un segundo plano las características hídricas y térmicas del ambiente de producción (Blum et al., 2008).

Sawchik y Ceretta (2005), señalan que la CAAD de los suelos del área agrícola tradicional y no tradicional representa aproximadamente, solo un 1/4 o 1/3 del consumo de cultivos de soja de primera con rendimientos potenciales. Por otra parte, los suelos que presentan mayor CAAD se ubican en Tacuarembó

y Rivera, los cuales no son mayormente aptos para cultivar soja debido a los elevados niveles de aluminio intercambiable que presentan.

Castaño et al. (2010), analizando una serie de más de 25 años desde 1980 hasta el 2006; en promedio el porcentaje de agua disponible de los suelos es siempre inferior a su CAAD para el período comprendido entre el inicio de primavera e inicio del otoño. Por lo tanto se esperable que la mayor parte del área de soja de primera sufra estrés hídrico.

Asimismo, Giménez y García (2011) indican que durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos de verano realizados en secano se presentan una serie de limitantes que impiden la obtención de rendimientos potenciales, destacándose las deficiencias hídricas como uno de los principales factores que afectan el rendimiento.

Giménez y García (2011), estudiando una serie de años desde 1984-2010, detectan que la evapotranspiración de los cultivos (ETc) de verano presenta variabilidad entre años, destacándose los años “Niña” y “Niño” con los mayores y menores valores respectivamente. Por otra parte, estos autores concluyen que las estimaciones de la evapotranspiración real (ETr) fueron sustancialmente menores que la ETc en la mayoría de las situaciones agroclimáticas planteadas. En la gran mayoría de los años estudiados ocurrieron deficiencias hídricas, excepto en años «Niño» (1997) o en años con PP muy superiores al promedio (2000). Las máximas deficiencias hídricas estimadas variaron entre 410 y 474 mm para soja GM IV y soja GM VI en Colonia y Salto respectivamente y se produjeron en años «Niña».

La información anterior explica que el aumento de la producción total de soja ha estado relacionado al aumento del área, ya que el rendimiento no se ha modificado durante estos años, manteniéndose en el entorno de las 2 t ha⁻¹ (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

2.4. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL RENDIMIENTO DE SOJA

2.4.1. Potencial productivo

Según Otegui (2009), el rendimiento potencial de una especie es aquel que se obtiene en un ambiente dado en ausencia de estreses bióticos y abióticos. En estas condiciones, el rendimiento depende de la capacidad de fijar carbono a través de la fotosíntesis, la cual estará regulada por la cantidad de radiación que el cultivo sea capaz de interceptar (asumiendo al CO₂ como un recurso de oferta constante por parte de la atmósfera y no sujeto a modificaciones significativas en el corto plazo).

El potencial productivo es un atributo genético cuya expresión está fuertemente condicionada por el ambiente y generalmente asociado de forma inversa a la longitud del ciclo. Esto se debe a que los materiales de ciclo largo instalan su llenado de granos más tarde recibiendo menor radiación solar y temperatura durante este período (Baigorri et al., 2000).

Cooper, citado por Giménez (2007), destaca que la temperatura y el fotoperíodo son las principales limitantes climáticas en la obtención del rendimiento potencial de soja, en ausencia de deficiencias hídricas. A su vez, estos parámetros ambientales son los que regulan las variaciones en la fenología de soja, así como la interacción entre ellos (Kantolic et al. 2003, Constable y Rose, Sinclair et al., citados por Giménez 2007).

2.4.2. Producción de materia seca

Para lograr altas producciones de materia seca (MS) en una estación de cultivo se necesitan elevadas radiaciones solares y temperaturas diurnas óptimas para el proceso fotosintético, esto posibilita altas tasas de crecimiento y prolongadas duraciones de las etapas fenológicas (Andrade y Sadras, 2000b).

Según Salvagiotti (2009), en ausencia de limitantes hídricas y nutricionales, se debe manejar el cultivo de soja de modo que desarrolle un canopeo que permita maximizar la intercepción de radiación solar durante la etapa reproductiva temprana.

Shibles et al., citados por Mondino (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.

Según Andrade y Sadras (2000b), la producción de MS en ensayos conducidos bajo riego fue de aproximadamente 12 t ha⁻¹ de MS en todo el ciclo del cultivo.

Datos de Valentinuz, citado por Andrade y Sadras (2000b), en experimentos conducidos bajo riego en localidad de Balcarce, la producción de biomasa aérea total fue de 9,7 t ha⁻¹ de MS para una densidad de 30 plantas m⁻².

Mondino (2006), señala que la máxima acumulación de MS vegetativa se produce después de R5.5, mientras que los valores máximos de MS reproductiva se alcanzan a R7, momento en el que obtienen también los mayores valores de MS total. Los máximos volúmenes de producción se

registraron en R7 con un promedio de 10,5, 11,9 y 14,6 t ha⁻¹ para los distanciamientos de 0,70; 0,52 y 0,35 m respectivamente, para una población de 350.000 plantas ha⁻¹, en experimentos conducidos bajo riego en la zona de Santiago del Estero, Argentina.

Buyatti et al. (2006), reportan para las condiciones del NE argentino, producciones de biomasa aérea a R6 que varían entorno 4,8 a 5,2 t ha⁻¹ para distintos cultivares en condiciones de secano.

Canfalone et al., citados por Vaiman (2010), encontraron que la reducción de disponibilidad hídrica afectó negativamente la evolución del IAF y de la MS. Los autores explican la caída del IAF por efectos de la sequía, debido a una reducción en el crecimiento foliar y a una aceleración de la senescencia de las hojas.

Perticari (2006), observó producciones de MS de entre 7 y 8 t ha⁻¹, en secano para distintas dosis de fertilizantes, para la zona de Bs As.

Canfalone et al. (2002), en un experimento conducido en Buenos Aires lograron resultados donde el tratamiento regado alcanzó su rendimiento máximo durante los tres años de 23 t ha⁻¹ de MS, mientras en el tratamiento sin riego, el máximo alcanzado fue de 13,8 t ha⁻¹.

2.4.3. Tasa de crecimiento del cultivo

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es una función lineal de la radiación interceptada (Shibles et al., citados por Mondino, 2006), e indica la acumulación de materia seca por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Radford, citado por Mondino, 2006).

Baigorri et al. (2000), para Argentina y Shibles et al., citados por Mondino (2006), para EE.UU, mencionan que los valores de TCC durante la fase lineal del crecimiento oscilan entre 8,6 y 18,6 g m⁻² d⁻¹ respectivamente.

La tasa de crecimiento media entre los 40 y 80 DPE es de 18,6 g m⁻² d⁻¹ (Andrade y Sadras, 2000b).

Como ya fue mencionado anteriormente, la TCC es afectada por el déficit hídrico mediante la reducción de la eficiencia de conversión y menor expansión foliar lo que reduce la intercepción de luz (Karam et al., 2005).

La 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, 2006).

Según Shibles et al., citados por Mondino (2006), la TCC está estrechamente relacionada con la intercepción solar alcanzando su máximo valor cuando el canopeo es capaz de interceptar el 95% de la radiación solar incidente

Según Frederick et al. (2001), los efectos negativos del déficit hídrico sobre la TCC sólo 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).

El número final de granos que el cultivo puede establecer en relación al número potencial, se asocia principalmente con la tasa de crecimiento de los individuos del cultivo durante el PC de fijación de vainas y semillas (Vega y Andrade, 2000) lo cual concuerda con lo señalado por Andrade y Ferreiro, Charles-Edwards, Egli et al., Vega et al., citados por Rotundo et al. (2011). Estos autores indican que el número de granos en soja depende de la acumulación de biomasa en órganos reproductivos durante el periodo comprendido entre R1 y R5.

2.4.4. Deficiencias hídricas y su influencia en la producción

El agua 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 y Vélez, citados por Currié et al., 2006).

La utilización del agua absorbida por el cultivo que se destina a la formación de los tejidos vegetales es muy baja, siendo al proceso de transpiración el que la utiliza en mayor medida. 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, citados por Currié et al., 2006)

El estrés hídrico es considerado uno de los factores más importantes que limitan el crecimiento de la planta y el rendimiento en el mundo (Boyer, 1982).

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. Para disminuir la intensidad del estrés hídrico durante los períodos críticos, las prácticas de manejo deberán orientarse a obtener un balance de agua más favorable para el cultivo durante esos estadios (Dardanelli et al., 1992).

El término sequía indica que se trata de un período prolongado sin lluvias (Dardanelli et al., 1992) y puede ser causada por escasez de agua disponible para las plantas o una alta demanda evaporativa. En la mayoría de los casos la sequía resulta de la combinación de ambos factores (Andrade y Sadras, 2000b). La intensidad, duración y momento de ocurrencia en relación al estado de desarrollo del cultivo son característicos de la sequía que determinaran los efectos sobre el cultivo (Andrade y Sadras, 2000b).

Otegui et al. (2006), señalan que entre los diversos estreses que sufren los cultivos a campo, el déficit hídrico y/o nutricional son los que los afectan principalmente. En primera instancia se ve disminuida la superficie fotosintetizante, a través de reducciones en la expansión foliar o la ramificación de las plantas, limitando el rendimiento en la medida que reduce la capacidad de captura de luz. Los estreses de mayor intensidad también pueden afectar la eficiencia de conversión de la radiación capturada en biomasa y la partición de biomasa hacia estructuras de cosecha

El déficit hídrico suele provocar pérdidas de turgencia, que resultan 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., 1992).

El crecimiento y el desarrollo de soja son regulados por el fotoperíodo, temperatura, radiación incidente y disponibilidad de agua que además afectan la partición de asimilados y los procesos de re-movilización y senescencia. 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 (Andrade y Sadras, 2000b).

Según Santos (2009), 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 fijación biológica del nitrógeno (economía del nitrógeno). 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.

La intensidad del déficit hídrico debe relacionarse en soja con la capacidad potencial de almacenaje de agua del suelo, la capacidad de exploración radicular y con el estado de desarrollo del cultivo (Sawchik y Cerreta, 2005).

García et al. (2009), señalan que el momento de ocurrencia de la deficiencia hídrica es importante, porque a una misma intensidad de deficiencia, el efecto en el rendimiento será distinto según el estadio del cultivo.

En soja el PC comienza a partir de R4 donde se fija el número de vainas (Andriani, 2002). A partir de este momento y hasta R6, la ocurrencia de cualquier tipo de estrés reducirán el rendimiento más que si el mismo ocurre en cualquier otra etapa (Baigorri et al., 2000).

El período más sensible es el comprendido entre las etapas R4,5 a R5,5, ya que la capacidad de compensación se reduce, debido a que la floración casi ha finalizado y al aborto floral se le agrega el de las vainas pequeñas, que son más susceptibles a abortar que las más grandes. Las pérdidas de rendimiento en esta etapa, resultan de reducciones en el número de vainas, con menores reducciones de semillas por vaina y peso de semillas (Baigorri et al., 2000)

Según Andriani (2002), existen tres subperíodos con respuesta diferenciada a la ocurrencia de estrés hídrico. Estos son el período vegetativo, que va desde la emergencia del cultivo a inicio de floración (E-R1) (Fehr y Caviness, 1977). El comprendido entre inicio de floración (R1) e inicio de llenado de granos (R5). Y el último que corresponde al llenado de granos (R5-R7).

En estados vegetativos el cultivo posee alta plasticidad la cual se reduce en etapas reproductivas (Baigorri et al., 2000). En este período deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50% de agua disponible en el suelo (AD) si bien pueden disminuir el área foliar y la altura de la planta, no producen

reducciones en el rendimiento en semilla. Las intensidades mayores (contenidos entre 20 y el 40 % de AD) podrían producir reducciones en rendimiento en semilla del orden del 10% (Andriani, 2002).

Si bien 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. Scott et al., citados por Carballo de Silva (1990), señalan que la semilla de soja requiere el 50 % de su peso en agua para germinar, determinando esto que sea más exigente que la mayoría de los cultivos.

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

Se coincide que a partir de floración aumentan las necesidades hídricas (Mambrin et al., 2005).

Según Carballo de Silva (1990), un déficit severo en floración reduce los rendimientos al disminuir el número de vainas por plantas, aunque no afecta el número de semillas por vaina.

Según Andriani (2002), el período R1-R5, es más susceptible a deficiencias hídricas que la etapa vegetativa, ya que intensidades medias pueden producir reducciones en el rendimiento en semilla del orden del 10 % y deficiencias severas un 20 % o más. La reducción del rendimiento 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 cesa la deficiencia hídrica en la etapa siguiente.

Según Salvagliotti et al. (2010), cualquier tipo de estrés que sufra el cultivo en el periodo R1-R5 afectará el número potencial de semillas.

La alta producción de flores y el extenso período de floración le permite escapar a cortos períodos de estrés. La incidencia de estrés entre R1-R3 no producen importantes pérdidas de rendimiento ya que la floración se prolonga hasta R5 (Baigorri et al., 2000).

Como se mencionó anteriormente durante el periodo R2 hasta R5 queda determinado el número de granos por unidad de área de suelo, y solo puede ser compensado en algunas situaciones por un aumento del peso unitario de granos (Baigorri, citado por Pergolini, 2004).

Las caídas en los rendimientos en diferentes situaciones productivas se deben, en general, a una disminución en el número de granos (Gutiérrez y Scheiner, citados por Pergolini, 2004.)

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

El llenado de grano es para varios autores el período más sensible al déficit hídrico (Carballo de Silva, 1990). Según Andriani (2002), este es el período más crítico para el cultivo de soja, respecto a esto García et al. (2009), señala que el llenado de granos la etapa más susceptible al déficit hídrico.

Un estrés en llenado de grano produce la reducción simultánea del número de vainas, del número de semillas por vaina y del peso de las semillas. Las deficiencias hídricas severas provocan pérdidas de rendimiento muy importantes de hasta 40 % o más (Andriani, 2002).

Si el estrés hídrico ocurre durante el llenado de grano, el peso de las semillas será el componente de rendimiento afectado (Salvaghiotti et al., 2010).

Desde la madurez fisiológica a cosecha el consumo de agua disminuye pero se necesita cierta cantidad de agua para complementar la producción de semilla, escasa disponibilidad puede causar arrugamiento de los granos, mientras que excesiva puede propiciar enfermedades fúngicas en el grano perdiendo calidad (Carballo de Silva, 1990).

Board et al. (1999), clasifica los componentes del rendimiento en: 1) primarios o directos, los cuales modifican el rendimiento final siendo estos el número de grano por unidad de superficie y peso de grano, y 2) componentes de rendimiento secundarios o indirectos, que son las vainas por unidad de superficie y granos por vaina, y que en definitiva modifican el número de granos (NG) por metro cuadrado. Por otro lado, para los componentes secundarios, el número de vainas generalmente tiene mayor influencia sobre el NG que el NG por fruto (Board et al., 1999). El límite superior del NG por vaina está determinado genéticamente, no obstante, este componente puede variar (Baigorri, citado por Pergolini, 2004).

2.4.5. Índice de cosecha

La acumulación de MS en grano depende de la disponibilidad de asimilados, haciendo variar la tasa de llenado de grano (Andrade et al., 2000a).

Según Andrade et al. (2000a) se espera algún tipo de relación general entre el IC y el uso del agua. Las sequías durante etapas reproductivas tempranas pueden aumentar el IC en soja con respecto al testigo regado (Andriani, citado por Andrade et al., 2000a).

Andriani, citado por Andrade y Sadras (2000b), determinó un aumento en el IC, como resultado del déficit hídrico y lo atribuye a una reducción del crecimiento vegetativo sin afectar el rendimiento significativamente.

2.5. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

Las necesidades de agua de los cultivos son variables y corresponden a la evapotranspiración en el ambiente en que se desarrollan y a la aplicación de la tecnología utilizada en cada situación productiva (Pereira y Alves, citados por Giménez y García, 2011). De igual forma Andriani (2000), señala que el consumo de agua de los cultivos comprende el agua transpirada por las plantas y la evaporada directamente del suelo.

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) es la que caracteriza la demanda atmosférica. Esta es inherente a cada ambiente y se caracteriza a través de la ET_o siendo la principal fuerza motriz de esta demanda, la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre (Allen et al., citados por Otegui, 2009). Según Allen et al. (2006), la mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o, representando esta un indicador de la demanda climática.

La evapotranspiración de cultivo (ET_c) representa el requerimiento de agua de un cultivo, y es afectada por las características del cultivo como por las del clima y suelo, por lo cual se deben medir para cada región (Allen et al., 1998).

Doorembos y Pruitt, 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.

El K_c es el cociente entre la evapotranspiración del cultivo ET_c y la ET_o, representando el efecto integrado de cuatro características principales que diferencian a un cultivo en particular del cultivo de referencia. Estas

características son altura del cultivo, albedo, resistencia del cultivo, y la evaporación que ocurre en el suelo (Allen et al., 2006). Otegui (2009), señala que este cociente adquiere valores cercanos o superiores a 1 durante las etapas de máxima cobertura del suelo. Y en la mayoría de las especies de interés, estas etapas suelen coincidir con los períodos más asociados a la determinación del rendimiento.

Por otra parte, para la Allen et al. (2006), la evapotranspiración en condiciones no estándar se denomina ETc ajustada, pudiendo ser esta menor a la ETc debido a la existencia de condiciones no óptimas y a esta se la suele llamar ETr (Allen et al., citados por Giménez, 2007). La ETr es la cantidad de agua perdida hacia la atmósfera desde el suelo y desde las plantas, en determinadas condiciones meteorológicas de disponibilidad de agua en el suelo y crecimiento del cultivo (Hatfield, citado por Andrade et al., 2000a). Giménez y García (2011), señalan que en condiciones de cultivos de secano, es un factor con escasas posibilidades de manejo y está determinada principalmente por la demanda atmosférica, ocurrencia de PP, CAAD de los suelos y las características morfo-fisiológicas del cultivo. Indicando que la diferencia entre ETc y ETr representa las deficiencias hídricas del cultivo.

2.5.1. Requerimientos diarios de agua

La mayor proporción del 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).

Las tasas de ETc aumentan a medida que se incrementa el área foliar y la intersección de radiación fotosintéticamente activa (IRFA), y generalmente llega a un máximo poco antes de lograr la cobertura completa (Rhodas y Bennett, citados por Andrade et al., 2000a).

Reicosky y Heatherly, citados por Andrade et al. (2000a), señalan un rápido incremento en la tasa de ETc entre V3 y V6, y máximos valores entre R1 y R6.

La tasa de ETc media diaria en el ciclo del cultivo de soja se estimaron en 4 mm día^{-1} , siendo la máxima del orden de los $7,6 \text{ mm día}^{-1}$. Este último

valor es coincidente con el 80% o más de intercepción de (IRFA), la que es lograda en soja cuando se alcanza un IAF de 3.5 (Andrade et al., 2000a).

Andriani (2000), expone que en soja los consumos de agua diarios más altos prácticamente coinciden con los momentos de máxima sensibilidad a deficiencias hídricas. Señalando consumos decádicos máximos del orden de los 5,3 y 5,0 para sojas de 1ª y 2ª respectivamente.

2.5.2. Consumo total de agua

El consumo de agua de los cultivos es el valor de la evapotranspiración acumulada en todo su ciclo. Esta depende de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo y del área foliar desarrollada por éste (Gerster y Bacigaluppo, 2009). En referencia a esto, se ha demostrado que la acumulación de biomasa está relacionada linealmente con la transpiración acumulada (Tanner y Sinclair, citados por Martín de Santa et al., 2005)

Según Andriani (2002), los valores de consumo que se obtengan, sin limitaciones de agua en la zona explorada por las raíces, van a depender de la demanda atmosférica, de la duración del ciclo del cultivo y del área foliar desarrollada por éste.

Andrade et al. (2000a), determinaron un consumo de agua de 454 mm para el cultivo de soja, en la zona de Balcarce para el período comprendido entre los años 1993-1996.

Barrios (2009), estimó ETr para distintas formas de laboreo en soja en la Pcia. de Buenos Aires, República Argentina (zona perteneciente a la subregión Pampa Ondulada). El autor determinó que la ETr fue de 485, 425 y 380 mm para siembra directa, laboreo reducido y laboreo convencional, respectivamente. En este trabajo también se estimó la ETc, que en todos los casos fue superior a la ETr, determinando esto la existencia de deficiencias hídricas.

Giménez y García (2011), analizando una serie histórica de años desde 1984 a 2006, para dos cultivares de soja y para dos zonas contrastantes del Uruguay; estimaron que la ETr promedio para el GM VI fue de 409 para Colonia y 443 mm para Salto, mientras que el GM IV presentó en promedio una ETr de 352 y 360 mm para Colonia y Salto, respectivamente.

Las ETc estimadas fueron superiores a las ETr en la mayoría de las situaciones planteadas, las diferencias entre ETc y ETr representan las deficiencias hídricas en los cultivos. Se observaron diferencias entre las ETc y

las ETr de los cultivos en la mayoría de los años analizados, excepto en los años «Niño» como 1997 y en los años que presentaron PP muy superiores al promedio como el año 2000, en que el consumo potencial de agua de los cultivos fue similar al consumo real. Se destaca que las diferencias máximas entre las ETc y las ETr ocurrieron en años «Niña» como 1988 y 1999, así como en años en que las PP ocurridas estuvieron muy por debajo del promedio como el año 2006 en la localidad de Salto (Giménez y García, 2011).

2.5.3. Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua (EUA) relaciona la producción de materia seca o rendimiento con la ET. La misma varía entre especies, debido a su tipo de metabolismo fotosintético C3 o C4, composición de la biomasa, y a las características del uso del agua, variando también entre climas que condicionan la demanda atmosférica.

Según Andrade y Sadras (2000b), la soja presenta una baja eficiencia fotosintética y además un alto contenido energético del grano, y por lo tanto baja EUA respecto a otros cultivos de verano.

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. (1988), son para maíz de $10 - 24 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; en girasol $5 - 9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; en soja $5 - 11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. (Micucci, 2004a).

2.6. RIEGO

2.6.1. Manejo de agua de riego

En Uruguay, la superficie potencial de riego es de 1.760.000 ha, aplicándose efectivamente al regadío 210.000 ha, o sea que en el 2000 solo se utilizaba una novena parte del potencial (Aquastat-FAO, citado por Dardanelli et al., 2010).

En sistemas de producción bajo riego es de gran importancia conocer la cantidad 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).

Al inicio de la etapa reproductiva, los excesos hídricos provocan un incremento de la altura de planta y pueden 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 del grano (Carballo de Silva, 1990).

Mambrin et al. (2005), en un experimento en la zona de Paraná en la provincia de Corrientes, señala que los riegos no deben ser abundantes, con el objetivo de evitar encharcamientos ya que el cultivo es muy sensible al mismo, una vez comenzado no debe cortarse puesto que entonces acarrea importantes mermas en la producción, y a partir de la floración hasta la cosecha los riegos deben ser periódicos.

El número de vainas por planta es la variable más significativa para definir el rendimiento en las modalidades de riego suplementario (Currié, 2004).

Estudios en la programación del riego para la soja han 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).

2.6.2. Capacidad de almacenamiento de agua disponible

La CAAD, es la cantidad de agua que potencialmente puede ser extraída por las plantas. Una vez que excede el contenido de agua a capacidad de campo (CC) es agua que no retiene el suelo y drena libremente a través del perfil del suelo; cuando el agua es retenida a presiones inferiores al contenido de agua a marchitez permanente (CMP), no es susceptible generalmente de ser extraída por las plantas cultivadas (Pereira et al., 2010).

Se define como CC a la cantidad de agua que es retenida en el suelo luego de transcurridas 48-36 horas después de una lluvia o riego, momento en el cual a cesado casi por completo el movimiento de agua gravitacional. En este momento, el agua se ha desplazado de los macroporos para retenerse únicamente en los microporos, a una tensión matriz de 0,1-0,3 bar. Por otro lado, el CMP se define como el límite inferior de disponibilidad de agua para las plantas, cuando esta se encuentra en los microporos a una tensión matriz de 15 bars (Allen et al., 2006)

2.6.3. Factor de agotamiento del suelo (p)

En términos teóricos existe AD para el cultivo hasta alcanzar el PMP, sin embargo la cantidad de agua extraída por el cultivo se reduce significativamente antes de alcanzar dicho umbral de mínima. Cuando el contenido de humedad del suelo está 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).

El factor de agotamiento (p) es la fracción de agua que puede ser agotada en la zona radicular antes de que se presente un estrés hídrico. Un valor de 0,50 es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos incluyendo a la soja (Allen et al., 2006).

En la mayor parte de los trabajos referidos al tema, 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 (Andriani, 2002.).

La combinación particular de oferta hídrica, demanda atmosférica y estado ontogénico condiciona el umbral del contenido hídrico del suelo en el cual se manifiestan restricciones al crecimiento (Otegui, 2006).

Pereira (2010), propone un valor de p de 0,5 para soja. Este es definido como la fracción de agotamiento permisible de humedad de suelo, en condiciones no restrictivas, siendo el límite a partir del cual la disponibilidad de agua en el suelo disminuye la transpiración de los cultivos, afectando el rendimiento. Este valor está referido a una ETc de 5 mm día⁻¹, y para situaciones de no salinidad. Sin embargo, se podrán aumentar los valores de p cuando la ETc es < 5 mm día⁻¹, o reducirla en caso contrario. En este sentido, el autor señala que, para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ETc es alto, p será entre un 10 y 25 % menor que el presentado, y el suelo se encontrará relativamente húmedo aún cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Por otra parte, cuando la ETc del cultivo es baja, el valor de p será hasta un 20 % superior.

En general se utiliza un valor constante de p para cada etapa específica del ciclo de crecimiento y desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de p de acuerdo a la ETc es: $p = 0,5 + 0,04(5 - ETc)$, donde el valor ajustado es limitado a $0,1 \leq p \leq 0,8$

(Pereira, 2010). Este autor, señala también que para suelos de textura fina el valor de p puede reducirse entre un 5 y 10 %, mientras que para suelos arenosos puede incrementarse entre un 5 y un 10 %.

Rosadi et al. (2005), señala que el “ p ” es la fracción del agua del suelo que el cultivo puede extraer a través de la zona radicular sin sufrir estrés, y se puede estimar como el cociente entre Agua realmente disponible (ADR)/agua disponible (AD) en la zona radicular. Siendo el ADR: agua que se encuentra entre la CC y el contenido crítico de agua del suelo (q_c). El AD se calcula como la resta entre CC y CMP. El q_c es el valor agua del suelo a partir del cual la planta comienza a estresarse, ya que por debajo de este no la puede extraer con facilidad. Este valor se encuentra entre CC y PMP.

Según Carballo de Silva (1990), desde emergencia hasta inicio de floración, demasiada humedad tiende a producir volcamiento de las plantas y afectar el rendimiento. Por otra parte, el autor señala que los mejores rendimientos se obtuvieron cuando regaron después de agotado el 60 % (40 % de AD) de agua del suelo. Cuando regaron con solo 40 % (60 % AD) de agotamiento, se redujo el rendimiento, de igual forma sucedió cuando se regó con 80 % de agotamiento (20 % de AD).

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 % previo a floración y en condiciones de baja demanda atmosférica e inferiores al 60 % del AD post floración (Andrade y Sadras, 2000b).

2.6.4. Riego deficitario

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 (Krida et al., citados por Rosadi, 2005).

Cuando el agua del suelo es igual o mayor al contenido de agua crítico (q_c) la E_{Tr} es igual a la E_{Tc} , pero si este es menor el coeficiente $E_{Tr}/E_{Tc} < 1$ y la planta comienza a estresarse (Rosadi et al., 2005). James, citado por Rosadi et al. (2005), propone que si el suelo se encuentra entre la CC y el q_c , a cualquier contenido de agua dentro de este rango, el rendimiento esperado debe ser mayor al esperado si contenido de agua del suelo se encuentra entre el q_c y el PMP. Referido a esto, Rosadi et al. (2005) proponen que el riego sin deficiencias en todo el ciclo sea planificado para mantener el agua del suelo siempre por encima del q_c .

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

Por otra parte, Allen (1998), propone que se puede calcular la evapotranspiración ajustada (ET_{aj}) cuando el cultivo está bajo estrés hídrico (contenido de agua del suelo por debajo del q_c)

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

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).

Doorenbos y Kassam, citados por Rosadi et al. (2005, 2007) proponen que es necesario conocer la relación existente entre la pérdida de rendimiento relativa y el déficit de ET relativa, para conocer el efecto del déficit hídrico. Y lo sintetizan a través de la siguiente ecuación:

$1 - Y_a/Y_c = K_y (1 - ET_{aj}/ET_c)$, donde K_y es el factor de respuesta de rendimiento que fue estimado por estos autores en 0,851 para soja, durante todo el período de crecimiento bajo estrés hídrico. Y_a y Y_c son los rendimientos obtenidos para las condiciones con y sin limitantes de agua respectivamente.

Rosadi et al. (2005), concluyen que será necesario el conocimiento de q_c y k_s para la aplicación del riego deficitario de manera tal que el contenido de agua del suelo puede estar por debajo de q_c, pero con rendimientos lo suficientemente altos

El RD ha sido ampliamente investigado como una estrategia de producción valiosa y sostenible en las regiones secas. Al limitar las aplicaciones de agua a las etapas de crecimiento sensibles al déficit hídrico, esta práctica tiene como objetivo maximizar la productividad del agua y estabilizarla, en lugar de maximizar los rendimientos. Los resultados de investigación confirman que RD tiene éxito en el aumento de la productividad del agua para diversos cultivos sin causar severas reducciones de rendimiento (Rosadi et al., 2005).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” de la Facultad de Agronomía, ubicada sobre la ruta 3, Km. 363, Departamento de Paysandú, Uruguay (32°22' S 58°03' W), durante el año agrícola 2009-10. El experimento se realizó sobre un suelo clasificado como Brunosol sub-éutrico típico perteneciente a la unidad San Manuel, según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, incluida dentro de la formación Fray Bentos.

A través del análisis químico del suelo realizado previo a la instalación del ensayo se constató un contenido de P de 10 ppm. Las características hidrológicas del suelo se presentan en el cuadro siguiente.

Cuadro No.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
A-B	0-70		289	178	111

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

3.1.1. Manejo experimental

El laboreo realizado fue de tipo convencional y constó de dos pasajes de rastra excéntrica y uno de vibro cultivador. En el mes previo a la siembra se fertilizó con 300 Kg ha⁻¹ de Super Fosfato de Calcio (0-46-0) que fue incorporado con excéntrica.

El ensayo se sembró el 11 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 pl.ha⁻¹.

En febrero se aplicó Clorpirifos para control de lagarta de hoja, la dosis utilizada fue de 1 lt. de producto comercial ha⁻¹. El 22 de febrero se realizó una aplicación de Tiametozam + Lambdacihalotrina en dosis de 1 lt ha⁻¹ para el

control de chinches. Además se realizaron los controles necesarios de malezas mediante la aplicación de herbicida Glifosato.

Cuadro No. 2: Calendario de eventos fenológicos

Fecha	Estado fenológico	Días post emergencia
11/11/2011	Siembra	
25/11/2011	Emergencia	0
21/12/2011	R1	26
29/12/2011	R2	34
11/01/2012	R3	47
19/01/2012	R4	55
10/02/2012	R5	77
27/02/2012	R6	94
30/03/2012	R8	125

Para la aplicación de la metodología experimental consideramos 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 = Sin deficiencias hídricas en el todo el ciclo.
(60 % AD o más, durante el PC y 40 % AD o más durante los períodos no críticos (PNC))
- T2 = Deficiencias hídricas desde Emergencia hasta R4
(40 % AD o menos desde emergencia a R4 y 60 % AD o más durante el PC)
- T3 = Deficiencias hídricas etapa vegetativa y PC (40 % AD o menos desde emergencia a R4 y 60 % AD o menos durante PC y 40 % AD o más en R1 y R2)
- T4= Secano

Los mencionados tratamientos se distribuyeron aleatoriamente en unidades experimentales, las cuales fueron 12 parcelas constituidas cada una

por 5 hileras del cultivo de 5 m de longitud, sembradas con 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 el tratamiento con déficit hídrico a través de la utilización de simuladores de sequía parcelarios y móviles (ver Anexo 1).

Los mismos fueron construidos en estructuras de hierro con cubiertas de lonas impermeables. 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 transformaciones 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” construida en tierra, a modo de impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento. Y también fueron construidos desagües para evacuar el exceso de agua.

El método de riego utilizado fue por goteo, lo que permite agregar agua con gran precisión en el volumen y en la etapa de desarrollo definida. Cada hilera del cultivo dispuso de una cinta de goteros con un caudal de 1.47 lt h^{-1} , espaciados cada 20 cm.

Se realizó un balance hídrico (BH) de suelo diario, de acuerdo a la siguiente fórmula: $\Delta H_2O = R + PP - ET_c$, siendo R= mm agregados de agua de riego, PP=mm de lluvia y ET_c =mm de evapotranspiración de cultivo, calculada por el método $ET_c = ET_o \times K_c$. Donde ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia y K_c es el coeficiente del cultivo. La ET_o fue calculada utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith y los K_c recomendados por FAO.

Se debe aclarar que las características de los eventos de PP ocurridos durante el mes de febrero, no permitieron la correcta aplicación de la metodología experimental, ya que se logró controlar parcialmente el ingreso de agua a los tratamientos con deficiencias hídricas planificadas.

3.1.3. Agua recibida mediante riego y precipitación en los tratamientos

Utilizando la información obtenida mediante los registros pluviométricos mensuales y el balance hídrico diario se determinó el consumo de agua de los distintos tratamientos.

Cuadro No. 3: Aporte de agua mediante uso de riego y precipitaciones.

Riego	T1	T2	T3	T4
Diciembre	108	108	91	105
Enero	252	239	258	181
Febrero	36	28	36	14
Marzo	0	0	0	0
Total	396	375	385	300
PP	T1	T2	T3	T4
Diciembre	48	48	0	0
Enero	67	0	69	45
Febrero	368	126	368	126
Marzo	139	139	139	139
Total	622	313	576	310

3.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DEL EXPERIMENTO

3.2.1. Hipótesis biológicas

En soja las disponibilidades hídricas iguales o superiores a 60 % AD durante los PC de determinación del rendimiento, y superiores o iguales a 40 % AD en los PNC, permiten obtener rendimientos potenciales para el ambiente de producción en el que se desarrolla.

3.2.2. Hipótesis estadísticas

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

Ha: Existe al menos una diferencia entre las medias de los tratamientos.

3.2.3. Diseño experimental

El diseño utilizado fue un DBCA (Diseño en bloques completos al azar), con tres bloques y cuatro tratamientos (ver Anexo 2).

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

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: $i: 1,2,3,4$

$j: 1,2,3$

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
- $\epsilon_{ij} \sim N$
- $E(\epsilon_{ij}) = 0$ para todo i, j
- $V(\epsilon_{ij}) = \sigma^2$ 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 $= 0 < \alpha = 0,05$ 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

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron tres muestreos de MS en la etapa reproductiva, siendo estos correspondientes a los estadios R3, 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 R3-R6. Se debe aclarar que no se presentan los datos de MS y TCC R3-R6 para el T4 debido a errores al momento de muestreo de la MS a 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 estos, 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 dos situaciones en las que el % AD superó el factor de agotamiento (p) establecido. El primer caso se da a los 46 DPE, correspondiente al día 6/2/2012, momento en cual ocurre un problema en el sistema de riego, determinando que las parcelas del T3 fueran regadas de forma involuntaria. La otra situación se da a los 76 DPE en este mismo tratamiento, en cual ocurren eventos de PP de gran magnitud, que determinan durante 10 días consecutivos durante el PC el % AD sea superior a 60 %.

3.3.2. Determinaciones a cosecha

Para estimar rendimiento y sus componentes se cosecharon manualmente 4 m lineales de plantas, representativos de las hileras centrales de cada parcela. Además se realizó el conteo y el pesaje de granos con la finalidad

de obtener el peso de mil granos (PMG). Se determinó asimismo la humedad a cosecha para cada tratamiento.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con el software estadístico “INFOSTAT” versión estudiantil 2010. 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.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN EL PERÍODO DEL CULTIVO

4.1.1 Precipitaciones

En la Figura 1, se presentan las PP mensuales registradas en la estación meteorológica de la EEMAC y los valores de PP promedio para la ciudad de Paysandú, obtenidos en la serie histórica comprendida entre los años 1961 y 2009. Se aprecia las PP de la primavera y del verano 2011-12, la cual se caracterizó por presentar en los meses de diciembre y enero PP que no superaron la media histórica, ubicándose éstas en torno a los 75 mm para cada caso. Sin embargo, en el mes de febrero ocurrieron eventos de PP que determinaron la acumulación de 409 mm, significando esto una superioridad de más del 300 % con respecto a la media histórica de la zona. Como se observa en el mes de marzo las PP continuaron por encima de los promedios.

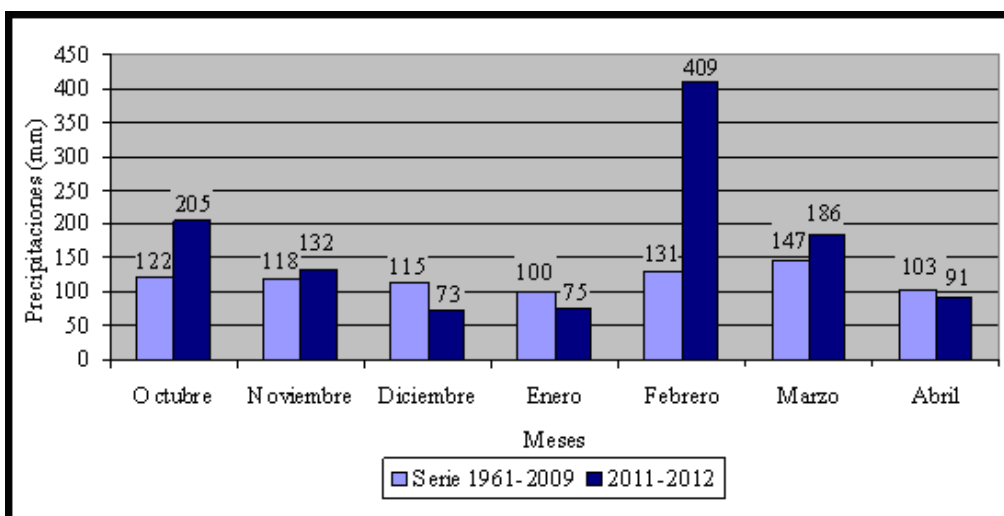


Figura No. 1: Precipitaciones promedio ocurridas en Paysandú para la serie histórica 1961 a 2009 (barras celestes), y valores obtenidos en la estación meteorológica de la EEMAC, para el año 2011-12 (barras azules, elaborado en base a datos proporcionados por la URUGUAY. MDN. DNM, 2011, y en base a datos proporcionados por EEMAC²)

² Facultad de Agronomía. EEMAC. Estación Meteorológica Automática. 2012. Datos pluviométricos mensuales (sin publicar).

4.1.2. Radiación solar incidente

Como se observa en la Figura 2, únicamente durante el mes de febrero se registró una situación de menor radiación solar en la zafra 2011-12 frente al promedio de la serie histórica considerada para la EEMAC. Esto es consecuencia de lo observado en la Figura 1.a, con valores de PP superiores a la media, que determinaron una nubosidad elevada, generando menor radiación solar en el mes mencionado con respecto al promedio histórico.

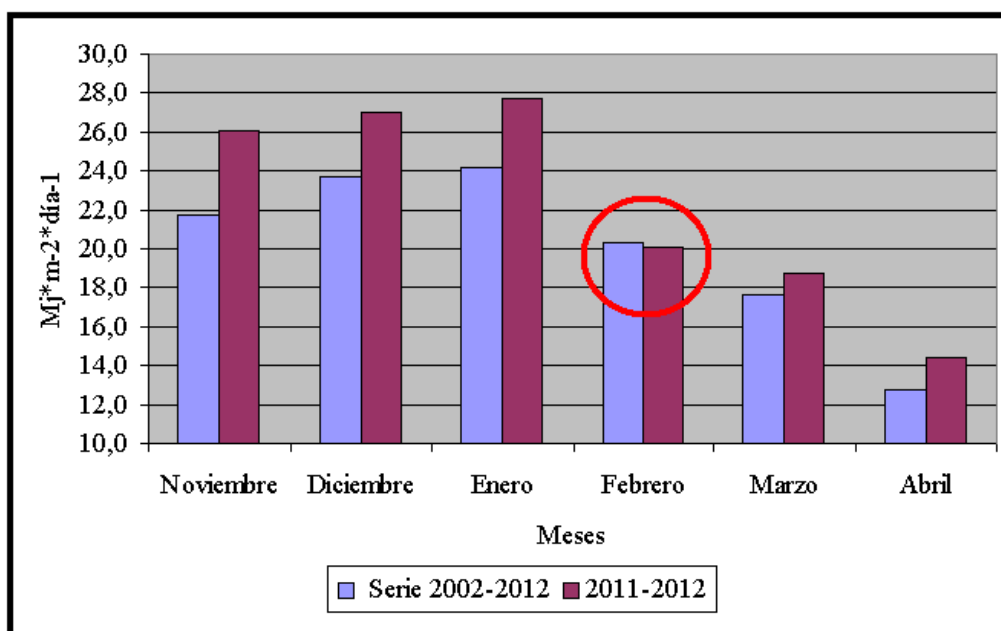


Figura No. 2: Radiación solar ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) ocurrida durante 2011-12 y valores promedio de la serie histórica 2002-12, elaborado en base a datos obtenidos en EEMAC³.

A nivel de cultivo, y teniendo en cuenta que el PC se ubicó entre el 19 de enero (R4) y el 27 de febrero (R6), esta menor radiación pudo tener consecuencias en el rendimiento potencial. En este sentido son varios los autores que coinciden en que es determinante en el rendimiento la cantidad de radiación incidente así como la que es capaz de ser interceptada por el canopeo (Baigorri et al. 2000, Andrade y Sadras 2000b, Mondino 2006, Otegui 2009, Salvagioti 2009).

³ Facultad de Agronomía. EEMAC. Estación Meteorológica Automática. 2012. Datos de radiación solar mensual (sin publicar).

4.2. DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

4.2.1. Evolución del agua disponible en el suelo

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

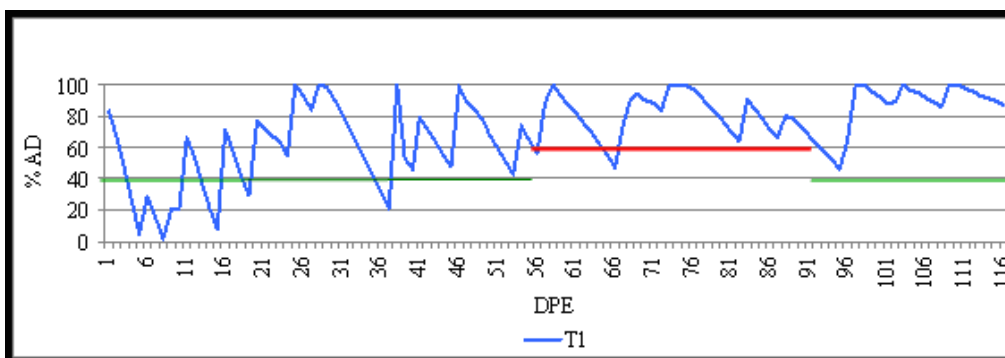


Figura No. 3: Evolución del AD en el T1. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC y las líneas rojas para el PC.

A pesar de que al T1 se pretendió mantenerlo en condiciones de bienestar hídrico durante todo el ciclo del cultivo, en la Figura 3 se puede observar que existió un breve período de deficiencias hídricas al comienzo de la etapa vegetativa, con valores inferiores al 40 % AD. Esta deficiencia se prolongó durante los siguientes 20 DPE. Si bien estos valores de déficit son mayores al p considerado por Andriani (2002) para la etapa vegetativa, que es de entre 20 y 40 % de AD, los mismos no se consideraron restrictivos para el crecimiento de soja, debido a que las deficiencias hídricas se manifestaron en las etapas muy tempranas del ciclo entre la etapa de cotiledón (aproximadamente 5 DPE) y V1 (aproximadamente 20 DPE).

Para el resto del ciclo del cultivo, se asumió que la dispersión del contenido de agua con respecto al umbral objetivo fue mínima y no repercutió en el rendimiento en grano.

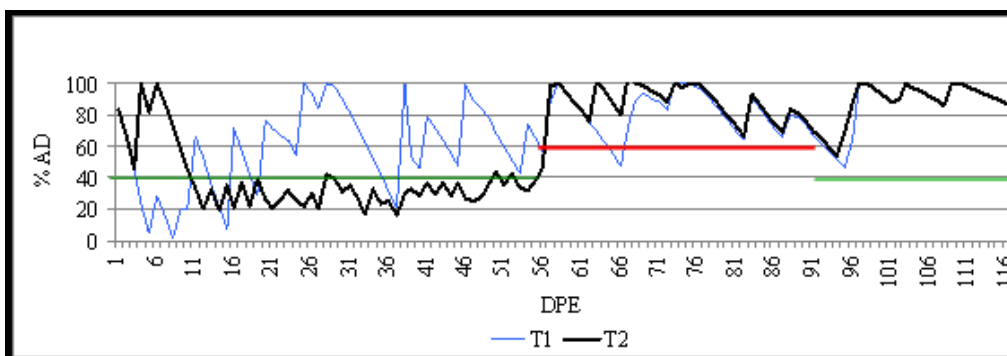


Figura No. 4: Evolución del AD en el T1 y el T2. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC, y las líneas rojas indican el umbral de riego para el PC.

En la Figura 4 se observa que el T2 se encontró en estrés hídrico durante más del 80 % del período vegetativo, esta restricción se levantó a partir de R4, con niveles de AD superiores al 60 %, desde el comienzo del PC hasta las cosecha. De manera que con este tratamiento se buscó evaluar la influencia del estrés hídrico en las etapas previas al PC. En relación a este aspecto, se puede esperar que no existan diferencias importantes de rendimiento en grano entre los T1 y T2, debido a que es a partir de R4 comienza el período más sensible al déficit hídrico (Carballo de Silva 1990, Baigorri 2000, Andriani 2002). Es en ese estadio, en el cual se reestablece el contenido de agua del suelo, para el T2, lo que podría estar promoviendo determinados mecanismos fisiológicos en la planta que permiten en conjunto maximizar el rendimiento, a través de la obtención de un elevado número de granos por unidad de superficie (Kantolic y Satorre, 2004).

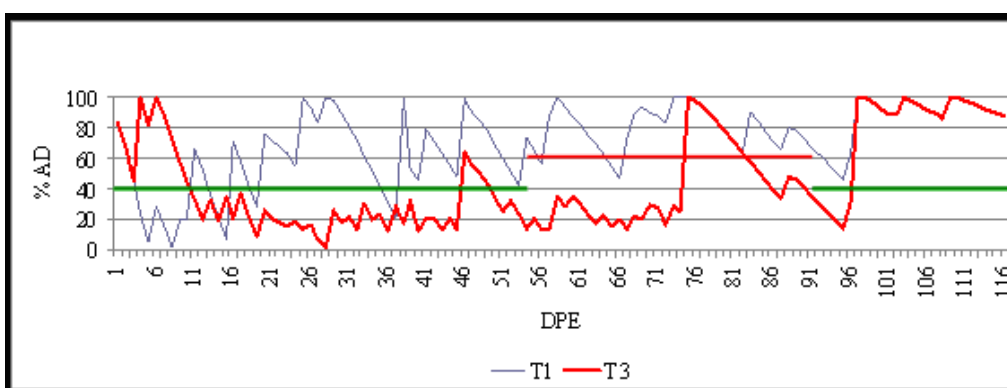


Figura No. 5: Evolución del AD en el T1 y el T3. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC y las líneas rojas para el PC.

En la Figura 5 se observa que existieron dos ingresos de agua no planificados en el T3, los cuales superaron el umbral establecido en cada etapa. Durante el PC, en un 25 % del mismo se vio superado el umbral esto pudo tener consecuencias negativas en el rendimiento. Por lo mencionado anteriormente, se debe analizar este tratamiento teniendo en consideración este ingreso de agua. De todas maneras, es esperable que existan diferencias en rendimiento y en el NG por unidad de superficie al comparar el T3 frente al T1 y T2. Debido a que durante un 75 % del período más sensible al déficit hídrico (Carballo de Silva 1990, Baigorri 2000, Andriani 2002), el cultivo se encontró en condiciones de estrés hídrico.

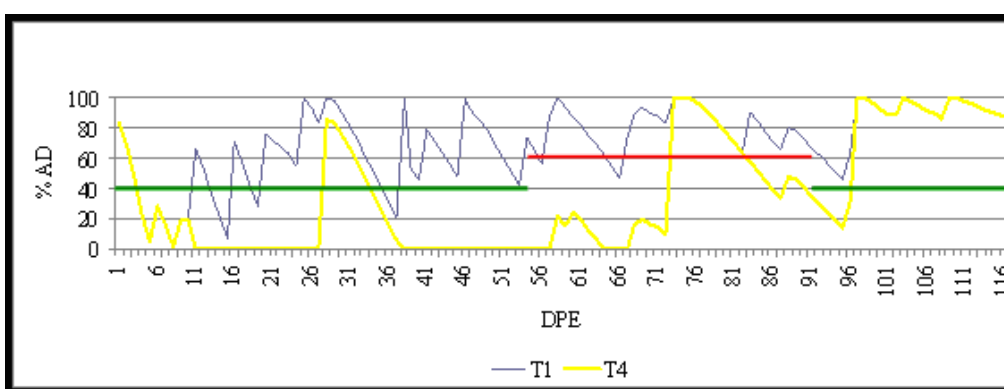


Figura No. 6: Evolución del AD en el T1 y el T4. Las líneas verdes indican el umbral de riego para el PNC y las líneas rojas para el PC.

En la Figura 6, se puede observar la evolución del % AD en el T4 estas presentaron deficiencias hídricas en el período vegetativo del cultivo y en el período reproductivo hasta los 71 DPE (momento en que el T4 se encontraba en R4.5 aproximadamente). Durante los primeros 71 días del ciclo del cultivo, el mismo se encontró bajo condiciones de déficit hídrico durante el 90 % del tiempo. El período mencionado ocupó la mayor parte de los meses de diciembre y enero.

Como se ve en la Figura 6, existen dos períodos en la última parte del ciclo del cultivo, en el cual el umbral es superado debido a los eventos de PP ocurridos. El primero de estos períodos corresponde al comprendido entre los 71 y 84 DPE momentos en los cuales el T4 se encontraba en R4.5 y R5.5 respectivamente. Considerando que el PC en soja va desde R4 a R6 (lo que está representado por la línea roja en la Figura 5), se concluye que durante un 40 % del tiempo del PC, el cultivo estuvo en condiciones de bienestar desde el punto de vista hídrico.

El segundo período sin restricciones hídricas para el cultivo comienza a partir de R6 y se extiende hasta R8, observándose contenidos de 100 % de AD en el suelo durante esta etapa.

4.2.2. Parámetros de crecimiento

4.2.2.1 Evolución de la MS durante el período crítico

En la Figura 6, se muestra la evolución de la MS durante el período comprendido entre los estadios R3-R6. En base a esto se discute la incidencia de la disponibilidad hídrica sobre la acumulación de MS en el período.

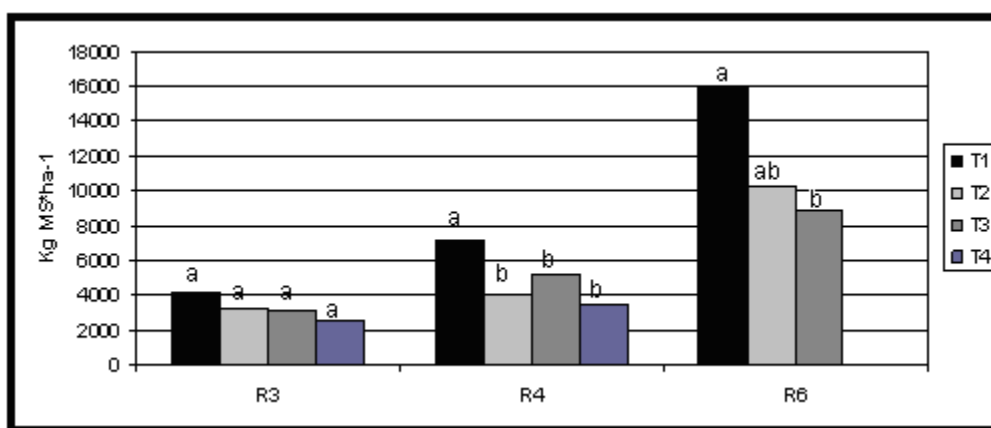


Figura No. 7: Evolución de la MS (Kg ha^{-1}), para los estadios R3, R4 y R6. Valores seguidos de igual letra en un mismo estadio, no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En el estadio R3 no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. Este resultado no coincide con lo expresado por Andrade y Sadras (2000b), quienes expresan que cultivos sometidos a deficiencias hídricas, reducen la intercepción de radiación y/o disminuyen la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. La reducción en la radiación interceptada ante deficiencias hídricas es consecuencia de una menor expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar. Por otra parte Andriani (2002), señala que deficiencias hídricas de mediana intensidad (40-50 % de AD) en el suelo pueden disminuir el área foliar y la altura de la planta.

Sin embargo en este experimento no se encontraron diferencias entre los tratamientos evaluados. Esto puede deberse a que la producción de MS en soja depende del cultivar utilizado y las condiciones ambientales imperantes en el momento en que se realizó el experimento¹.

Grasso y Montero (2011), evaluando el mismo cultivar y en la misma zona no observaron diferencias entre los tratamientos evaluados. Sin embargo la producción del T1 fue de 2 t ha^{-1} de MS, producción 50 % inferior a la obtenida en este experimento para el mismo tratamiento al estadio R3.

Esta situación evidencia la clara influencia del ambiente sobre la producción de MS para un mismo material genético. Dicho experimento se realizó en la primavera-verano 2009-10, año caracterizado como “Niño”, que determinó que las PP superaran ampliamente la media histórica, estableciendo esto, que los niveles de radiación estuvieran por debajo del promedio para la región. Las condiciones ambientales fueron inversas a las del experimento que se analiza, sobre todo desde emergencia hasta R3.

En el estadio R4, se observan diferencias estadísticamente significativas entre el T1 y los demás tratamientos. En este momento el T1 presentó una producción de 7 t ha^{-1} de MS. En este sentido Otegui (2006), señala que frente a condiciones de estrés lo que se ve resentida en primera instancia, es la superficie fotosintetizante, debido a reducciones en la expansión foliar o la ramificación de las plantas. Esto también coincide con lo expresado por Andrade y Sadras (2000b), quienes afirman que condiciones de estrés hídrico generan menor expansión foliar y/o una mayor senescencia de hojas. Según Salvagiotti (2009), en ausencia de limitantes hídricas y nutricionales, se debe manejar el cultivo de soja de modo que desarrolle un canopeo que permita maximizar la intercepción de radiación solar durante la etapa reproductiva temprana, condición lograda en este experimento en el T1.

Al estadio R6, se observa que no existen diferencias significativas entre el T2 y T3, los cuales presentaron producciones de biomasa de 10 y 9 t ha^{-1} de MS, siendo el T3 significativamente inferior al T1 que presentó una producción de 16 t ha^{-1} de MS. Estos resultados concuerdan con lo expresado por Andrade y Sadras (2000b), Otegui (2006), Canfalone et al., citados por Vaiman (2010), quienes señalan que la reducción en la disponibilidad hídrica afecta negativamente la producción de MS.

Por otra parte, no se puede afirmar que la acumulación de biomasa a R6 entre el T1 y T2 fue diferente estadísticamente. Esto se debió a que se levantó el estrés hídrico al T2 a partir de R4 determinando una mayor TCC en período R4-R6 y así una mayor acumulación de MS.

Según Otegui (2009), los factores de la región y las características del cultivo como GM afectan la fotosíntesis y la transpiración, y por ende la producción de biomasa. Por lo tanto, este último es un parámetro que tiene poco poder de comparación si no se tienen en consideración las características

ambientales y genéticas del cultivo, cuando se contrastan diferentes resultados. Pero lo que se puede afirmar es que el momento de mayor producción de biomasa vegetativa ocurre después de R5,5 (Mondino, 2006). En este sentido Grasso y Montero (2011), no encontraron diferencias significativas entre la producción de biomasa a R5 y R6 para el mismo cultivar entre el T1 y el secano, dadas las particulares condiciones del año.

En la bibliografía se reportan distintos valores de producción de MS a R6, que van desde los 4,8 t ha⁻¹ de MS en ensayos de secano en la zona del NE argentino (Buyati, 2006), hasta valores de 23 t ha⁻¹ de MS en ensayos conducidos bajo riego en la zona de Buenos Aires (Canfalone et al., 2002). En contraste con los resultados obtenidos en este experimento, con los logrados por Grasso y Montero (2011), se observa una gran diferencia en las producciones de MS del T1, con producciones a R6 de 8.8 t ha⁻¹ de MS para este T, producción 45 % inferior a la obtenida en este experimento. Estos resultados, nuevamente ponen de manifiesto la influencia del ambiente en determinar las producciones de biomasa, y por lo tanto del rendimiento final en cada tratamiento.

4.2.2.2 Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la TCC durante R3-R6

Es de particular importancia la determinación de la TCC en el PC, ya que la misma se correlaciona positivamente con el NG fijados. Egli y Yu, Egli y Bruening, Frederick et al., Oya et al., citados por Grasso y Montero (2011), reportaron que la TCC entre R1 y R5 es directamente proporcional al NG por superficie a cosecha. Esta referencia, concuerda con los resultados obtenidos, donde la menor TCC del T3 resultó en una menor fijación de granos. En el mismo sentido Kantolic y Satorre (2004), establecen que el NG fijados por las plantas están relacionados con la TCC entre floración y mediados del llenado de grano.

En la Figura 8, se puede observar que las máximas TCC se dan en el T1 y el T2, los cuales no presentan deficiencias hídricas en el PC del cultivo. Por otra parte, existe una disminución en la TCC del T3 durante mencionado periodo, en un valor que oscila en 48 % con respecto al T1, resultado similar se obtuvo para el T4. Estas disminuciones son mayores a las reportados por Andrade y Sadras (2000b), quienes indican que bajo condiciones de estrés hídrico la TCC se redujo 30 % con respecto al testigo sin deficiencias.

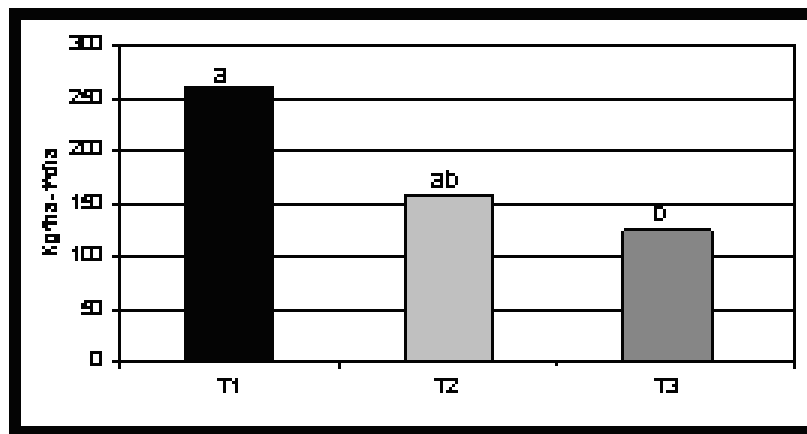


Figura No. 8: Tasa de crecimiento del cultivo durante R3-R6 para los tratamientos evaluados. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

La menor TCC puede atribuirse a una menor translocación de fotoasimilados en la planta, debido a la reducción de la fotosíntesis en las hojas y a la inhibición del crecimiento de los órganos de la planta (Sionit y Kramer, Canfalone et al., citados por Canfalone et al., 2002).

4.2.3. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre el rendimiento

En la figura 9 se muestran las diferencias en rendimiento entre los tratamientos evaluados.

Se destaca la diferencia de rendimiento existente entre el T3 respecto al T1 y T2, con una disminución del 36 % y 32 % respectivamente entre los tratamientos mencionados. Esta diferencia es atribuible a las deficiencias hídricas provocadas entre R4 y R6 en el T3, lo que redujo significativamente la TCC en dicho período y la MS a R6 con respecto al T1 como ya se mencionó.

En este sentido, existe concordancia entre varios autores entre los que se destacan Caraballo de Silva (1990), Andriani (2002), Salvagliotti (2010), los cuales señalan que deficiencias hídricas en esta etapa reducen el rendimiento, afectando principalmente el NG por superficie. Con respecto a la magnitud de la caída en el rendimiento en el T3, este valor es similar al reportado por Andriani (2002), quien indica que el estrés hídrico genera pérdidas de rendimiento en grano de 40 % o más.

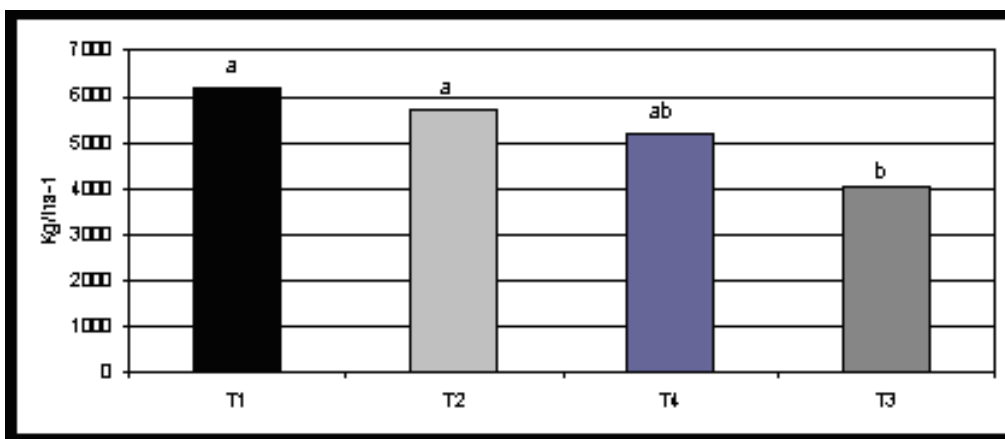


Figura No. 9: Rendimiento en grano (Kg ha^{-1}) para los tratamientos evaluados. Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En relación al comportamiento del T2 se puede concluir que las deficiencias hídricas ubicadas en el PNC, no producen disminuciones significativas en rendimiento con respecto al T1, esto es congruente con lo expuesto por Andrade y Sadras (2000b), quienes afirman que deficiencias hídricas tempranas tienen un efecto mínimo en el rendimiento del cultivo. De la misma forma que coincide con lo expuesto por Ashley y Ethridge, Elmore et al., Spetch et al., citados por García y García et al. (2010), quienes señalan que evitar el riego en etapas vegetativas genera rendimientos tan altos como si el cultivo fuera regado todo el ciclo.

El rendimiento obtenido en el T1 es mayor al logrado por Grasso y Montero (2011), quienes obtuvieron un rendimiento en grano para el T1 de $4,9 \text{ t ha}^{-1}$, aproximadamente una tonelada inferior al obtenido en este experimento. Sin embargo en el tratamiento de secano, el resultado es muy similar entre experimentos, ya que estos autores observaron un rendimiento de 5 t ha^{-1} , frente a los $5,1 \text{ t ha}^{-1}$ obtenidos en este caso. En ambos ensayos, no se observaron diferencias significativas entre el tratamiento en secano y el T1. Esto se debe a las condiciones ambientales de ambas zafras, con un evento “Niño” en 2009-10 y PP muy superiores a la media histórica para la región, en el momento en que ocurre el PC en el 2011-12. Sin embargo estas condiciones presentan muy baja repetibilidad de acuerdo a las series históricas nacionales (Grasso y Montero, 2011).

4.2.3.1. Relación entre rendimiento y sus componentes

En la Figura 10, se puede apreciar claramente que el NG es el principal determinante en la variación del rendimiento lo cual se ve reflejado en la alta correlación que existe entre las variables, obteniendo un valor similar al reportado por Grasso y Montero (2011). Por otro lado la variable peso de 1000 granos es la que menos influye en el rendimiento.

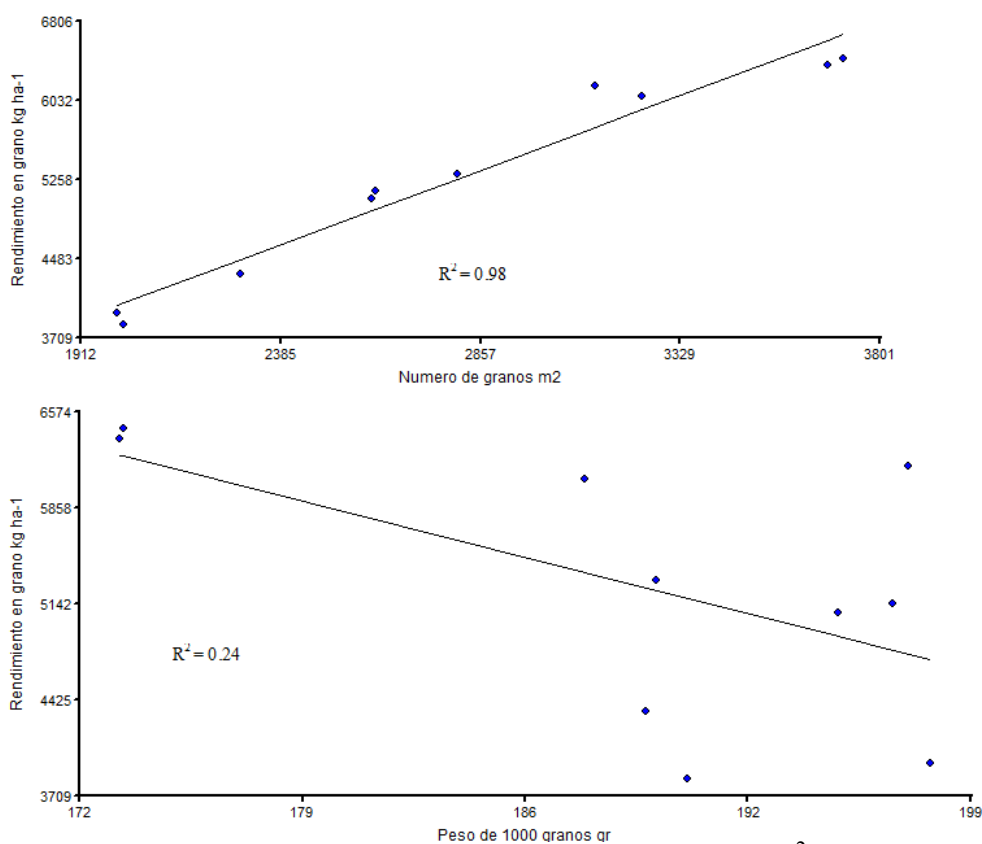


Figura No. 10: Rendimiento en función del No. de granos.m⁻² (superior) y el peso de 1000 granos (inferior).

La alta correlación entre No. de granos.m⁻² y el rendimiento obtenido en este experimento, coincide con lo reportado por Kantolic y Satorre (2004), Board y Modali (2004), Modali (2004), Bonjour et al. (2010)

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

Cuadro No. 3: Componentes numéricos del rendimiento

Tratamientos	Componentes del rendimiento	
	Numero de granos m ²	Peso de 1000 granos
T1	3348 a	186 a
T2	3070 ab	187 a
T3	2101 b	193 a
T4	2701 ab	192 a

Valores seguidos de igual letra no difieren entre sí ($p < 0.05$; Tukey).

En el Cuadro 3 se observan las diferencias que existen entre el T1 y el T3, se detectó un 24 % de reducción del NG en el T3 en relación al T1. Valores similares fueron reportados por Andrade y Sadras (2000b), quienes determinaron una reducción del 29 % en el NG por superficie cuando el consumo de agua se redujo un 50 % en comparación con testigos regados en la zona de Balcarce. En referencia a este aspecto, Andriani (2002) indica que deficiencias hídricas entre R4 y R5.5 afectan principalmente el NG y en estadios posteriores pueden disminuir el peso promedio de los granos.

El NG m⁻² del T1 presenta valores superiores a los conseguidos por Pergolini (2004), en ensayos realizados en zonas bajas con buena disponibilidad hídrica, en la zona de Chapaleufú, provincia de La Pampa, Argentina, quien obtuvo 2.600 granos m⁻² logrando un rendimiento promedio de 4,7 t ha⁻¹. Datos similares son publicados por Rodríguez et al. (2011), los cuales obtienen un máximo de 2906 granos m⁻² en los tratamientos sin limitantes hídricas.

Otro resultado a destacar es la ausencia de compensación entre los componentes del rendimiento, ya que ante la disminución del NG no se observó un aumento significativo del peso promedio de granos. Board et al. (1999), Pergolini (2004) señalan resultados similares analizando esta relación al comparar distintos ambientes de producción.

Estos resultados permiten concluir que el mayor NG por superficie a cosecha que presentaron el T1 y el T3 se explica fundamentalmente por las diferencias en la TCC durante el PC, ya que la cantidad de fotoasimilados disponibles se reduce cuando el cultivo es sometido a deficiencias hídricas. Por lo tanto, las condiciones ambientales que estimulen la tasa fotosintética y una elevada TCC conducirá a maximizar el NG (Kantolic et al., 2003).

En relación al componente peso de 1000 granos no fue afectado por los tratamientos, tal como lo reporta Gutiérrez y Scheiner, citados por Pergolini (2004), quienes sostienen que el peso de los granos se ve afectado en forma escasa.

4.2.5. Evapotranspiración del cultivo y eficiencia de uso del agua en el T1

La figura 11 se muestra la evolución de la ET_c estimada a lo largo del ciclo de crecimiento en el T1. Cabe señalar que solo fue posible estimar la ET_c en dicho tratamiento, debido a que para el cálculo de la ET_c bajo condiciones de estrés se debería utilizar factores de corrección que aun no se encuentran disponibles para la zona donde se realizó el experimento..

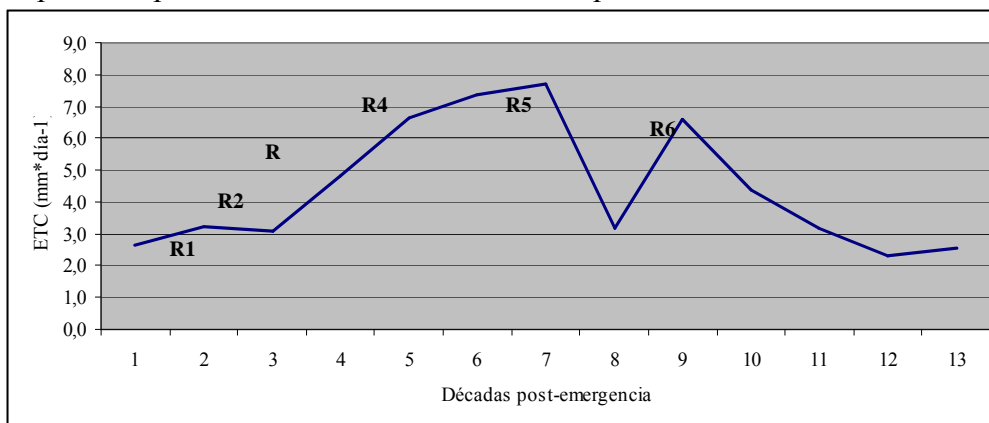


Figura No. 11: Evolución de la ET_c diaria (mm día⁻¹) según década post-emergencia.

A partir de R1 se observa un claro incremento en la demanda diaria de agua, esto coincide con lo expuesto por Rhodas y Bennett, citados por Andrade et al. (2000a), quienes señalan que la ET_c aumenta a medida que se incrementa el área foliar y la intersección de radiación fotosintéticamente activa llegando a un máximo generalmente poco antes de lograr la cobertura completa.

La ET_c máxima decádica promedio alcanzada ocurrió cuando el cultivo se encontraba entre R4 y R5, con valores de 7,4 y 7,7 mm día⁻¹ promedio para la década 6 y 7 post-emergencia. Estos valores coinciden con los expresados por Andriani (2000), que expone que las máximas demandas de agua coinciden con el momento de mayor sensibilidad al estrés hídrico, siendo este el PC del cultivo como ya se mencionó.

Para este experimento el valor máximo de ET_c alcanzado s fue de 8,7 mm día⁻¹, valores superiores a los reportados por Andrade et al. (2000a), quienes estimaron una tasas máximas del orden de los 7,6 mm día⁻¹. Sin

embargo, este dato es relativo al año dependiendo el mismo de la radiación solar, nubosidad, etc.

La ETc promedio en todo el ciclo del cultivo fue de 4,8 mm día⁻¹, estimándose una demanda total de agua de 548 mm. Estos resultados son superiores a los estimados por Giménez y García (2011), quienes estimando la ETc de soja de GM IV, obtuvieron valores de 509 mm en el ciclo para la zona de Salto en una serie histórica de 1984 a 2007. La superioridad de los valores obtenidos puede ser explicada por las diferencias en el largo de ciclo.

Grasso y Montero (2011), para el mismo cultivar y zona, obtuvieron valores inferiores de ETc promedio y consumo total de agua para el T1, los cuales fueron de 4,5 mm día⁻¹ y 435 mm, respectivamente. Aunque estos datos no sean totalmente comparables, debido a que dependen de las condiciones de año en que se realiza el experimento, se puede concluir que existe una tendencia de asociación positiva entre la cantidad de agua evapotranspirada por el cultivo y su rendimiento final, la cual puede visualizarse cuando analizamos los resultados obtenidos, donde la ETc fue un 16 % superior para el mismo cultivar y zona experimental, el cual logro un rendimiento 20 % superior para los T1 del presente experimento.

La EUA para la producción de granos se estima a partir de la ETc y el rendimiento del cultivo. En este experimento, la EUA fue de 11,3 Kg mm⁻¹ evapotranspirado, siendo este valor muy similar al obtenido por Grasso y Montero (2011), el cual fue de 11,2 Kg mm⁻¹ evapotranspirado. Micucci (2004), señala 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 este caso, tanto el manejo del cultivo como las condiciones ambientales (aunque diferentes para los distintos años) ubican al indicador por encima del rango propuesto por Micucci (2004).

En este sentido Della Maggiora et al., citados por Grasso y Montero (2011), señalan que tanto la ETc como la EUA son características variables, que están determinadas por las condiciones ambientales y características propias del crecimiento y desarrollo del material genético. Por lo tanto, como conclusión preliminar se podría decir que en este caso el material genético fue el principal determinante de una similar EUA, de este experimento y el de Grasso y Montero (2011).

5. CONCLUSIONES

La situación climática del verano en que se realizó el experimento presentó en los meses de diciembre y enero PP que no superaron a la media histórica para Paysandú, ubicándose en el entorno de 75 mm en cada mes. Sin embargo, en el mes de febrero ocurrieron PP que acumularon 409 mm lo que significó una superioridad de más de 300 % con respecto a la media para la zona. Esta situación climática determinó que la radiación solar media diaria en febrero, en que se ubicó mayoritariamente el PC, fuera 10 % inferior al promedio de los últimos 10 años.

El T1 sin deficiencias hídricas generó un rendimiento de 6,2 t ha⁻¹, resultando aproximadamente 4 t ha⁻¹ superior al rendimiento promedio nacional, que fue de 2.39 t ha⁻¹ para la zafra 2011-12. Cabe destacar que en este año se obtuvo la productividad máxima histórica del cultivo en el país.

La existencia de deficiencias hídricas durante el PNC del cultivo evaluadas en el T2, no provocó disminuciones significativas en el rendimiento con respecto al T1, obteniéndose en el T2 una producción de 5,8 t ha⁻¹.

Las características del año y principalmente la cantidad y distribución de las PP ocurridas durante el mes de febrero, generaron que para el T en secano evaluado en el T4, se obtuvieran elevados rendimientos, sin detectarse diferencias significativas con el T1 .

El componente numérico del rendimiento que explicó los resultados obtenidos fue el NG por m⁻², ya que el peso promedio de granos se mantuvo inalterado en los distintos T evaluados. En el T1 se lograron valores de 3348 granos m⁻², mientras que el valor mínimo se detectó en el T3 con 2101, determinándose una relación positiva entre el NG m⁻² y el rendimiento.

El T1 en el estadio R6 presentó la mayor acumulación de MS con una producción de 16 t ha⁻¹. Por otro lado el T3 fue el T que presentó la menor acumulación de MS, mostrando valores de 8,5 t ha⁻¹, comprobándose que las deficiencias hídricas producen efectos negativos sobre la acumulación total de MS a R6.

La TCC entre las etapas R3 y R6 fue de 260 Kg día⁻¹ de MS para el T1. Mientras que el T2 y el T3 presentaron los menores valores de TCC, con 157 Kg día⁻¹ de MS y 125 Kg día⁻¹ de MS, respectivamente, sin presentar estos últimos diferencias significativas entre ellos.

6. RESUMEN

Se desarrolló en la Estación Experimental “Dr. M. A. Cassinoni situada de Paysandú, Uruguay, un experimento en el cual se evaluó el efecto de diferentes niveles de AD en el suelo en distintas etapas del ciclo del cultivo de soja (*Glicyne max*, L.). El ensayo consistió en provocar deficiencias hídricas utilizando simuladores de sequía móviles y riego suplementario en diferentes etapas del ciclo del cultivo. Se determinaron las pérdidas en el rendimiento y en sus componentes, tanto como en producción de MS y TCC.. Se evaluaron cuatro tratamientos: T1 = Sin deficiencias hídricas durante el ciclo; T2 = Deficiencias hídricas desde Emergencia a R4; T3 = Deficiencias hídricas en etapas vegetativas y PC y T4= Secano. El diseño utilizado fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones y cuatro tratamientos. Se realizó el análisis de la varianza, donde se descompone la misma en los componentes del modelo, observándose que existen diferencias entre los tratamientos propuestos. Se concluyó mediante l prueba de Tukey que el T1 y T3 son estadísticamente diferentes, obteniéndose rendimientos de 6.2 t ha^{-1} y 4 t ha^{-1} respectivamente. El T2 no tuvo diferencias con el T1, lo cual se atribuye al bienestar hídrico durante el PC. Y en el T4 se lograron rendimientos tan altos como en el T1 de $5,8 \text{ t ha}^{-1}$. Por otra parte se analizaron las variables NG, PMG, MS R6 (Kg MS ha^{-1}), TCC ($\text{Kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$), para las que se validó el modelo propuesto, y se realiza el análisis de varianza para cada una de ellas, desprendiéndose de esto que la MS a R6, y el NG son las variables más afectadas por los tratamientos. Las TCC durante el período crítico registraron valores de $260 \text{ Kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, $157 \text{ Kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, $125 \text{ Kg MS ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para el T1, T2 y T3, respectivamente. A este parámetro se atribuye las diferencias en los resultados de este experimento por la influencia que ejerce sobre los componentes NG y acumulación de MS el crecimiento del cultivo durante la etapa crítica R4-R6. Los resultados indican que sin deficiencias hídricas en el PC se producen elevados rendimientos en grano, con alta producción de MS y elevadas TCC.

Palabras clave: Soja; Deficiencias hídricas; Agua; Riego.

7. SUMMARY

It was developed at the Experimental Station Mario A. Cassinoni located near the city of Paysandu, Uruguay, an experiment in which the effect of different levels of available soil water at different stages of the cycle of soybean (*Glycine max*, cultivar DM 5.1i), was evaluated. This was basically water deficiencies inducing drought simulators using both PC and mobile in PNC to determine the losses that may be incurred in the performance and its components, as well as in production of MS and also by determining TCC secondary yield components. Four treatments were evaluated: T1 = No water deficiencies in the whole cycle, T control (60% or more AD, during AD PC and 40% or more during the PNC), T2 = water deficiencies from EMERG. to R4 (40% or less from emergency AD to AD R4 and 60% or more for the PC), T3 = water deficiencies at vegetative stage and PC (40% or less from emergency AD to AD R4 and 60% or less for PC and 40% or more in AD R1 and R2) and T4 = Dry. The design was a RCBD (design in randomized complete block), with three blocks and four treatments. For it design the model assumptions were tested, and validated. Subsequently, the analysis of variance was performed (ANOVA), where it decomposes to model components, noting that there are differences between the treatments proposed. Concluding by Tukey test the T1 and T3 are statistically different, with yields of 6,2 t ha⁻¹ and 4 t ha⁻¹ respectively. The T3 had no differences with the T1, which is attributed to the well water for the PC, and the conditions of rainfall this year which were particularly abundant in the mentioned critical stage, provoked that the T4 can achieve high yields such as T1, being it yeild 5,2 t ha⁻¹. Moreover NG variables were analyzed, PMG, MS R6 (Kg MS ha⁻¹), TCC (Kg MS ha⁻¹ day⁻¹), for which validated the proposed model, and performs the ANOVA for each, shedding that the MS R6, and NG are the variables most affected by the treatments. The crop growth rate during the critical period reported values of 260 Kg MS ha⁻¹ day⁻¹, 157 Kg MS ha⁻¹ day⁻¹ for T1, T2 and T3. This parameter is attributed the differences in the results of this experiment, the influence of this on the components, grain number and dry matter accumulation. The results indicate that no water deficiencies in the critical period produce high grain yields, with high dry matter yield and high crop growth rate

Keywords: Soybean; Water deficiency; Water; Irrigation.

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. 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., ANDRADE, F.H, SUERO, E.E., DARDANELLI, J.L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, and its components. *Agronomie*. 11:77-746.
5. _____. 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 13: 27-30.
6. _____. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 2 (3): 48-51.
7. ARBELETCHÉ, P.; GUTIÉRREZ, G. 2011. Crecimiento de la agricultura en Uruguay: exclusión social o integración económica en redes. *Revista Pampa*. 6: 113-138.
8. BAETHGEN, W. E.; TERRA, R. 2010. El riego en un clima cambiante. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 7-18.
9. BAIGORRI, H.; CROATTO, D. 2000. Manejo del cultivo de soja en Argentina. Marcos Juárez, INTA. 28 p.
10. _____. 2004. Criterios para la elección y el manejo de cultivares de soja. Marcos Juárez, INTA. 21 p.

11. BARRIOS, M. 2009. Efecto del sistema de manejo de suelo en el desarrollo de raíces, absorción de agua y productividad en una rotación soja trigo en la Pcia. Buenos Aires, Argentina. Tesis Doctoral. Córdoba, Argentina. Universidad de Córdoba. 212 p.
12. BIDEGAIN, S. 2011. Cuantificación de la repuesta 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. 33 p.
13. BLUM, A.; NARBONDO, I.; OYHANTCABAL, G.; SANCHO, D. 2008. Soja transgénica y sus impactos en Uruguay; la nueva colonización. Montevideo, Uruguay, s.e. 194 p.
14. BOARD, J. M.; KANG, M. S.; HARVILLE, B. G. 1999. Path analyses of the yield formation process for late-planted soybean. *Agronomy Journal*. 91: s.p.
15. BOYER, J. 1982. Plant productivity and environment. *Agronomie*. 218: 443-448
16. 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 23 ago. 2012. Disponible en https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:YU0H-E66kzgj:www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt2006/05-Agrarias/2006-A-049.pdf+datos+biomasa+soja&hl=es&gl=uy&pid=bl&srcid=ADGEESHtlfYFOwnlVg0j51Ijyy5NHenc0FnKqC1jbv6V-4qwBjbZX9ofouqd9yiEBOk6IrXZQ48YRGwJvO0LJe4oygT4W_L4Oae8itCrkqrWWHfMbQcI2gzNZ4YKlnyW4UKrA9LZ&sig=AHIEtbQsQcWQNqtwgLz5PXa2qqanpZgZxg
17. CANFALONE, A.; VILLACAMPA, Y.; CORTÉS, M.; NAVARRO, M. 2002. Crecimiento de soja en función de la temperatura del aire y de la radiación fotosintéticamente activa. (en línea). *Revista Brasileira de Agrociência*. 8 (3): 185-189. Consultado 24 ago. 2012. Disponible en <http://www.ufpel.tche.br/faem/agrociencia/v8n3/artigo02.pdf>
18. CARBALLO DE SILVA L. 1990. Manejo del riego en soja sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. *Agronomía Tropical (Venezuela)*. 40: 35-56.

19. CASTAÑO, J. P.; CERONI, M.; GIMÉNEZ, A.; FUREST, J.; AUNCHAYNA, R. 2010. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo, INIA. 28 p. Consultado 5 feb. 2012. Disponible en http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara_agro/index.html
20. CORSI, W.C. 1978. Clima. Miscelánea CIAAB. no. 18:255-256.
21. CURRIÉ H.; CONTRERAS M.; ZINI. E. 2004. Efecto en los rendimientos de diferentes sistemas de riego gravitacionales y evaluación de la eficiencia de conversión del agua en cultivo de soja. Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. 3 p.
22. _____.; 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 28 feb. 2012. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt2006/05-Agrarias/2006-A-008.pdf>
23. DARDANELLI, J.; DE LA CASA, A. C.; ATECA, M.R.; ZANVETTOR, R.; NUÑEZ VAZQUEZ, F.; SALAS H.P. 1992. Validación del balance hidrológico versátil para la rotación sorgo-soja bajo dos sistemas de labranza. Revista de la Facultad de Agronomía (Buenos Aires). 13 (1): 25-32.
24. _____.; 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.
25. _____.; SEVERINA I.; ANDRIANI J. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo; su rol en la optimización del riego suplementario. In: Seminario Internacional Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 19-28.
26. DURÁN, A.; CALIFRA, A.; MOLFINO, J. H. 1999. Suelos del Uruguay según soil taxonomy. (en línea). Montevideo, MGAP. 14 p. Consultado 2 feb. 2012. Disponible en http://www.mgap.gub.uy/renare/SuelosyAguas/Estudios_Básico_de_Suelos/Informacion_Suelos_Uruguay.pdf

27. _____.; GARCÍA PRÉCHAC, F. 2007a. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. t.1, 334 p.
28. _____.; _____. 2007b. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. t.2, 358 p.
29. ERNST, O. 2004. Cambios en el paisaje de la diversificación, al imperio de la soja. Cangué. no. 26: 12-14.
30. FERH, W.R.; CAVINESS, C. E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Cooperative Extension Service. Special Report no. 80. pp. 929-931.
31. GARCIA, F. O. 2009. Introducción; marco de referencia del Simposio. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º, 2009 Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Facultad de Agronomía. Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. pp. 3-5.
32. GARCIA, H.; FERRAROTTO, M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soya (*Glicine Max*) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (en línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. pp. 21-27. Consultado 21 ago. 2012. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108
33. GARCIA Y GARCIA, 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.
34. GARCÍA PRÉCHAC, F.; DURÁN, A.; CALIFRA, A.; HILL, M. s.f. Propiedades hídricas de los suelos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
35. GERSTER, G.; BACIGALUPPO, S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. INTA. Para Mejorar la Producción. no. 42: 63-67.
36. GIMÉNEZ, L. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glicine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. *Agrociencia* (Montevideo). 11: 1-9.

37. _____.; GARCIA PETILLO, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15(2): 100-108.
38. GRASSO, J. P.; MONTERO, J. 2011. Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 56 p.
39. HATTENDORF, M.; REDELF, M.S.; AMOS, B.; STONE, L.R.; GWIN, R.E. 1988. Comparative water use characteristics of six row crops. *Agronomy Journal*. 80: 80-85.
40. HIRSCHY RUIZ, A. 2006. Desarrollo del cultivo de soja en Uruguay. (en línea). Rosario, Argentina, Mercosoja. 4 p. Consultado 09 ago. 2012. Disponible en http://www.acsoja.org.ar/mercosoja2006/Contenidos/Foros/paises_02.pdf
41. JIMENEZ DE ARECHAGA, P. 2007. Agua en Uruguay. Montevideo, Uruguay, s.e. 12 p
42. KANTOLIC, G.; GIMÉNEZ, P.I.; DE LA FUENTE, E.B. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. *In*: Satorre, E.H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de La Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina, Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
43. _____.; SATORRE, E.H. 2004. Elementos centrales de ecofisiología del cultivo de soja. *In*: Díaz-Zorita M.; Duarte G.A. eds. Manual práctico para la producción de soja. Buenos Aires, Argentina, Hemisferio Sur. pp. 19-37.
44. 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.
45. MACKLON, A.E.S.; MACKIE DAWSON, L.A.; SIN, A.; SHAND, C.A.; LYLLI, A. 1994. Soil P resources, plant growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant and Soil*. 163: 257- 266.
46. MAMBRIN, M.; BAST, R.; CURRIÉ, H.; DEBORTOLI, D.; MÉNDEZ, M. 2005. Evaluación del rendimiento de soja bajo riego en dos modalidades

y secano. Corrientes, Argentina, Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. 4 p.

47. MELGAR, R.; VITTI, G.; MELO BENITEZ, V. 2011. Soja en Latinoamérica. Instituto Internacional de la Potasa. Boletín no. 20: 25-48.
48. MICUCCI, F.; TABOADA, M.A; GIL, R. 2004a. El agua en la producción de cultivos extensivos. I. El suelo como un gran reservorio eficiente. Buenos Aires, FAUBA. Cátedra de Fertilidad de Suelos/INTA Castelar. 4 p.
49. _____. 2004b. 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.
50. MITCHELL, R.; RUSSELL, W. 1971. Root development and rooting patterns of soybeans. *Agronomy Journal*. 63:313-316.
51. 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
52. MOLFINO, J.H.; CALIFRA, A. 2001. Agua disponible de las tierras del Uruguay; segunda Aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección de Recursos Naturales Renovables. 12 p. Consultado 5 feb. 2012. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/renare>.
53. 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. In: Congreso de Soja del MERCOSUR (MercoSoja 06) (3º., 2006, Buenos Aires, Argentina). Sección Ecofisiología y Climatología. Entre Ríos, Argentina, Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp. 83-86.
54. NORMAN, A. G. 1983. Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 244 p.
55. OTEGUI, M. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis Magister Scientiae. Mar del Plata, Argentina.

Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. 93 p.

56. _____.; KANTOLIC, A.; MIRALLES, D. 2006. Aspectos clave de la estructura espacial y temporal de los cultivos; el uso de los recursos. *In*: Mundo Agro 2006: Tecnología y Sustentabilidad (Buenos Aires). Bases funcionales de los cultivos; hacia un manejo razonado de tecnologías clave. Buenos Aires, Argentina, Universidad Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 1-15.
57. _____. 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*. 44: 16-20.
58. PEDERSEN, P.; LAUER, G. 2004. Response of soybean yield components to management system and planting date. (en línea). *Agronomy Journal*. 96: 1372-1380. Consultado 20 ago. 2012. Disponible en http://corn.agronomy.wisc.edu/Pubs/JL_JournalArticles/96-1372.pdf
59. PERGOLINI, S. 2004. Factores que explican las variaciones de rendimiento del cultivo de soja entre los sectores de bajo y loma. (en línea). Buenos Aires, Argentina, s.e. Consultado 10 dic. 2012. Disponible en <http://www.elsitioagricola.com/articulos/pergolini/Factores%20que%20Explican%20Variaciones%20de%20Rendimiento%20de%20Soja%20entre%20Sectores%20de%20Bajo%20y%20Loma.asp>
60. PERTICARI, A. 2006. Ensayo de evaluación del producto NEPH en soja de primera. (en línea). Buenos Aires, Argentina. INTA Castelar. 8 p. Consultado 23 ago. 2012. Disponible en <http://www.neph-france.com/%5CResultados%20del%20INTA%2005-06.pdf>
61. 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.
62. _____.; _____.; _____.; _____. 2007. The effect of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (Glycine max [L.] Merr.). *Paddy Water Environment*. 5: 163-169.
63. SALVAGIOTI, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. Santa Fe, INTA. 2 p.

64. 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.
65. SANTOS PEREIRA, L.; ARTURO DE JUAN, J.; PICORNELL BUENDÍA, M.R.; TARJUELO, J.M. 2010. El riego y sus tecnologías. Lisboa, Portugal, Universidade de Lisboa. Trapada da Ajuda. CEER. Centro de Engenharia dos Biosistemas. Instituto Superior de Agronomia. 296 p.
66. SAWCHIK, J.; CERETTA, S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. Montevideo, INIA. pp. 41-51.
67. URUGUAY. MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL. DIRECCIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA. 2011. Características climáticas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 12 ago. 2012 Disponible en <http://www.meteorologia.gub.uy>.
68. _____. _____. _____. 2012. Características climáticas. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 may. 2012. Disponible en <http://www.meteorologia.gub.uy>
69. _____. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS. 2011. Encuesta Agrícola “Primavera – Verano 2011”. (en línea). Montevideo. 3 p. Consultado 10 feb. 2013. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,91,O,S,0,MNU;E;2;16;10;4;MNU;,>
70. _____. _____. _____. 2012. Cultivos y cereales industriales. Anuario Estadístico 2012: 57-58
71. _____. _____. _____. 2013. Estadísticas agropecuarias. Series históricas de datos. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 10 feb. 2013. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,60,O,S,0,MNU;E;2;16;10;9;MNU;,>
72. VAIMAN, N.; ELIZALDE, J.; LALLANA, V. 2010. Intercepción de radiación, área foliar y rendimiento de un cultivo de soja en el departamento Paraná. (en línea). Entre Ríos, Universidad Nacional de Entre Ríos. 11 p. Consultado 21 ago. 2012. Disponible en

http://www.fca.uner.edu.ar/academicas/deptos/catedras/WEBFV_2010/FVpdf/tema4_UNER_intercepcion%20de%20radiacion.pdf

73. VEGA, C. R. C.; ANDRADE, F. H. 2000. Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras. 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. 97-133.

9. ANEXOS

Anexo No. 1: Parcela de soja, donde se observa el sistema de riego por goteo y el simulador de sequía con que se cubrió las parcelas con deficiencias hídricas provocadas.



Anexo No. 2: Croquis del campo experimental.

