

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE  
BALANCE HÍDRICO DE SUELOS WINISAREG EN SOJA

por

Joaquín GRASSO GONZÁLEZ

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

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2015

Tesis aprobada por el tribunal integrado por \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_ el \_\_\_\_\_ 2015.

Autor: Joaquín Grasso González. Director: Ing. Agr. Luis Giménez.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi esposa e hijos, a mis padres, hermanos y amigos, que son lo más importante en mi vida.

Quiero agradecer especialmente a todas las personas que de una manera u otra me ayudaron durante la maestría y la realización de la tesis, y que sin su ayuda este trabajo no hubiese sido posible: a Luis Giménez, a Mario García Petillo y todos los integrantes de la Cátedra de Hidrología, a Gastón Canosa, a Mónica Cadenazzi, a los integrantes del CAP, a Agustín Montero, a Juan Pablo Grasso, a Richard Arévalo y a Matías y Gerónimo Giménez.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. SOJA ( <i>Glycine max</i> ).....	3
1.2. LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY.....	3
1.3. DESARROLLO DEL CULTIVO DE SOJA.....	5
1.3.1. <u>Estadios vegetativos</u> .....	5
1.3.2. <u>Estados reproductivos</u> .....	6
1.3.3. <u>Período crítico de determinación del rendimiento</u> .....	8
1.3.4. <u>Hábitos de crecimiento</u> .....	9
1.4. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO Y EL DESARROLLO.....	10
1.4.1. <u>Temperatura</u> .....	11
1.4.2. <u>Fotoperiodo</u> .....	12
1.4.3. <u>Disponibilidad hídrica</u> .....	14
1.4.3.1. Demanda atmosférica – evapotranspiración de referencia.....	14
1.4.3.2. Capacidad de almacenamiento de agua disponible.....	16
1.4.3.3. Precipitaciones.....	17
1.5. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA.....	18
1.5.1. <u>Producción de materia seca</u> .....	19
1.5.2. <u>Tasa de crecimiento del cultivo</u> .....	20
1.5.3. <u>Deficiencias hídricas</u> .....	22
1.5.4. <u>Rendimiento</u> .....	25

1.6. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS.....	26
1.6.1. <u>Evapotranspiración del cultivo</u> .....	27
1.6.2. <u>Coeficiente del cultivo</u> .....	27
1.6.2.1. Etapas del crecimiento del cultivo.....	28
1.6.2.2. Factores determinantes del coeficiente de cultivo....	30
1.6.3. <u>Evapotranspiración real del cultivo</u> .....	31
1.6.3.1. Disponibilidad de agua en el suelo – Agua disponible total.....	32
1.6.3.2. Agua fácilmente disponible.....	32
1.7. NECESIDADES DE AGUA DEL CULTIVO DE SOJA.....	34
1.7.1. <u>Eficiencia del uso del agua de la soja</u> .....	36
1.8. RIEGO.....	37
1.8.1. <u>Respuesta al riego suplementario</u> .....	38
1.8.2. <u>Riego deficitario</u> .....	39
1.8.3. <u>Manejo del riego suplementario</u> .....	41
1.9. METODO DE BALANCE HÍDRICO DEL SUELO.....	42
1.10. MODELOS DE SIMULACIÓN.....	44
1.10.1. <u>Modelo de balance hídrico de suelo Winlsareg</u> .....	45
1.10.2. <u>Calibración y validación del modelo</u> .....	47
1.10.3. <u>Ajuste estadístico de modelos de simulación</u> .....	48
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	51
2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO.....	51
2.1.1. <u>Manejo experimental</u> .....	52
2.1.2. <u>Tratamientos</u> .....	52
2.2. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	54
2.2.1. <u>Suelo</u> .....	54
2.2.2. <u>Cultivo</u> .....	55
2.2.3. <u>Condiciones climáticas</u> .....	55
2.3. MODELO Y METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	56
2.3.1. <u>Metodología utilizada para la calibración y validación del</u>	56

<u>modelo</u> .....	
2.4. BONDAD DE AJUSTE O AJUSTE ESTADÍSTICO DEL MODELO.....	58
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	60
3.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO WINISAREG.....	60
3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO WINISAREG.....	68
3.3. SIMULACIONES DEL MODELO WINISAREG.....	74
4. <u>CONCLUSIONES</u> .....	77
5. <u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	78
6. <u>ANEXOS</u> .....	92
Evaluación del modelo de simulación Winlsareg para soja en el litoral oeste del Uruguay para Agrocienca Uruguay.....	92
Precipitación diaria y riegos aplicados para cada tratamiento durante las dos temporadas evaluadas, 2011-12 y 2013-14.....	111

## RESUMEN

En Uruguay la disponibilidad hídrica es la principal limitante para la obtención de rendimientos potenciales en soja. El riego suplementario es una práctica tecnológica que permite aumentar y estabilizar los rendimientos. El objetivo del estudio fue calibrar y validar el modelo WInlsareg para soja en el litoral oeste del país. El modelo estima las necesidades de agua de los cultivos en condiciones de riego o seco, mediante la simulación del balance hídrico de suelos, esto permite su utilización como herramienta de planificación del riego. La información para calibrar y validar el modelo WInlsareg fue obtenida en los experimentos de riego realizados en Facultad de Agronomía en Paysandú durante las temporadas 2011-12 y 2013-14. Para desarrollar las simulaciones se requiere información del clima, suelo, cultivo y riego. El contenido hídrico del suelo fue monitoreado en forma periódica con sonda de neutrones. La calibración y validación consistió en ajustar los  $K_c$  y los “p” para las tres fases de desarrollo de soja (inicial, media y final) de forma tal que las diferencias entre los valores observados y simulados por el modelo del contenido de agua en el suelo fueran mínimas. Para la calibración se utilizó la base de datos de la temporada 2011-12 y en la validación se usó la información de 2013-14, con los valores de  $K_c$  y “p” logrados en la calibración. El  $K_c$  inicial con mayor grado de ajuste fue de 0,35, el  $K_c$  medio de 1,18 y el  $K_c$  final de 0,75. Los valores de “p” ajustados se ubicaron en 0,4 en las fases de mayor importancia en la disponibilidad de agua (germinación y etapas reproductivas) y para el resto del ciclo en 0,6. La validación se desarrolló para diferentes situaciones de disponibilidad hídrica, tratamientos de bienestar hídrico en todo el ciclo, riego deficitario y seco. Para las diferentes situaciones evaluadas los índices estadísticos indicaron un buen ajuste entre el contenido de agua del suelo simulado por el modelo y observado, el coeficiente de regresión (b) obtenido fue cercano a 1, la estimación de los errores a través de AAE y RCME fueron menores a 5%, el coeficiente de Willmott y la EF también cercanos a 1 y el  $R^2$  mayor a 0,83.

Palabras claves: Riego, balance hídrico, *Glycine max*.

## SUMMARY

### CALIBRATION AND VALIDATION OF THE SOIL WATER BALANCE SIMULATION MODEL WINISAREG IN SOYBEANS

In Uruguay the water availability is the main limiting factor to obtain crop potential yields. Supplementary irrigation is a technological practice that allows both yield increase and stabilization. The aim of this study was to calibrate and validate the model Winlsareg for soybean in the west coast of the country. The model estimates crops water needs under irrigation or rainfed conditions, by simulating the soil water balance. This allows its use as a planning tool for irrigation scheduling. The information to calibrate and to validate the model Winlsareg was obtained from irrigation experiments performed in the Agronomy Faculty, in Paysandú during seasons 2011-2012 and 2013-2014. To perform the simulations, data of climate, soil, crop and irrigation were required. The soil water content was periodically monitored by neutron probe. Calibration and validation was done to adjust the  $K_c$  and the "p" values for the three phases of soybean development (initial, mid and final) in such a way that the differences in soil water content, between the observed and the model simulated values, were minimal. Data of season 2011-2012 were used for the calibration while the 2013-2014 information was used in the validation.  $K_c$  and "p" values were obtained from the calibration. The  $K_c$  values with better adjustment were 0.35, 1.18 and 0.75 for the initial, mid and final phases. The adjusted values for "p" were 0.4 in the most important phases in relation with the water availability (germination and reproductive stages) and 0.6 in the rest of the cycle. The validation was performed for different situations of water availability, water wellness throughout the cycle, deficit irrigation, and rainfed treatments. For the different situations evaluated, the statistical parameters indicate a good fit between the model simulated soil water content and with the observed values. The regression coefficients (b) obtained were close to 1, the estimation of errors through AAE and RCME were lower than 5%, the coefficient of Willmott and the EF were also close to 1 and the  $R^2$  was higher than 0,83.

Keywords: Irrigation, Water balance, Glycine max.



## 1. INTRODUCCIÓN

El comercio mundial ha sido objeto de profundas transformaciones en los últimos quince años. El eje del crecimiento del comercio y de la economía internacional se ha trasladado hacia los países en desarrollo, con China como motor principal de estos cambios y un gran desarrollo en la región de América Latina (Pérez del Castillo, 2014).

Este contexto internacional ha modificado la agricultura mundial y ha tenido fuerte impacto en los mercados internacionales de productos agrícolas. La producción de soja ha crecido a una tasa media más de dos veces superior a la de todos los demás cultivos. Las exportaciones de soja y derivados representan hoy más del 10% del comercio agrícola mundial (FAO, 2003).

Este fenómeno se ha manifestado con particular intensidad en la región de América Latina; considerándose hoy la principal zona sojera del mundo. Donde la expansión de la soja ha tenido efectos importantes en la economía de los países sudamericanos, tanto en el ámbito macroeconómico como en lo relativo al sector agropecuario y agroindustrial, y ha dado origen a profundas transformaciones tecnológicas, económicas, financieras y sociales (FAO, 2014).

Uruguay no escapa a este fenómeno, donde en la última década el área dedicada a la agricultura se ha duplicado (DIEA-MGAP, 2014) siendo el cultivo de soja el que presenta mayor crecimiento de área y de producción. Si bien la producción total de soja ha aumentado considerablemente, los rendimientos muestran un estancamiento y una gran variabilidad interanual.

En los cultivos agrícolas se presentan un conjunto de limitantes para la obtención de los rendimientos potenciales, pero las deficiencias hídricas, especialmente en los cultivos de verano realizados en secano, se destacan como el factor principal en causar pérdidas en los rendimientos (Boyer 1982, Giménez 2012). Las consecuencias de las deficiencias de agua sobre el crecimiento y el rendimiento en grano, dependen de las etapas de desarrollo

en que ocurran, de las magnitudes que presenten las mismas y del cultivo que se trate (Dardanelli *et al.*, 2003).

Giménez (2012) reportó para las condiciones del país, grandes diferencias de rendimiento entre cultivos comerciales y el potencial de rendimiento de soja. Dichas diferencias se deben principalmente a deficiencias hídricas durante el ciclo del cultivo, las cuales pueden ser levantadas únicamente mediante la incorporación de riego suplementario, ya que las deficiencias no se logran levantar mediante otras medidas de manejo.

A su vez el gran desafío de la primera mitad del siglo XXI se convierte en el aumento de los rendimientos de los cultivos con la utilización de menos agua. Por lo que es imprescindible conocer y/o estimar las necesidades de agua de los cultivos a lo largo del ciclo en un ambiente determinado. De manera de poder desarrollar estrategias de riego que maximicen el rendimiento, con un manejo eficiente del agua.

Los modelos de simulación de balances hídricos (BH) de suelos son herramientas de gran utilidad para la determinación de las necesidades de agua de los cultivos. El modelo Winsareg permite computar el equilibrio del agua del suelo, y de esa manera se pueden generar alternativas de riego y evaluar los relativos impactos en los rendimientos de los cultivos.

Este modelo ha sido utilizado en varias regiones del mundo y para varios cultivos, partiendo de la calibración y la validación adecuada para cada región en que se utilizó a través de comparar el volumen de agua simulado con el observado en el suelo (Liu *et al.* 1998, Popova *et al.* 2006, Chaterlán *et al.* 2010, Popova y Pereira 2011). Sin embargo a nivel nacional su utilización ha sido escasa y hasta la fecha no ha sido evaluado para nuestras condiciones de producción.

El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo Winsareg para soja en las condiciones ambientales del litoral del país de manera de contribuir al manejo eficiente del uso del agua.

### 1.1. SOJA (*Glycine max*)

La soja (*Glycine max*) es una especie leguminosa anual y con ciclo de crecimiento estival. Existe una gran variabilidad genética dentro de la especie que permite la adaptación del cultivo a condiciones ambientales muy diversas. Los cultivares de soja se agrupan en grupos de madurez (GM) que van de 000 al X cuyas diferencias principales radican en el largo del ciclo y en el hábito de crecimiento (HC) del tallo principal, producto básicamente de diferentes respuestas al fotoperiodo.

El rendimiento está determinado por la interacción entre el potencial genético del cultivar y las condiciones del ambiente en las que crece y se desarrolla. El ambiente está determinado por las características del suelo como profundidad, estructura, resistencia mecánica, capacidad de almacenaje de agua, temperaturas, aireación y nutrientes, así como por las características climáticas como temperaturas, radiación solar, fotoperiodo y régimen hídrico. Algunas de estas condiciones pueden ser alteradas en cierta medida por prácticas de manejo como fertilizaciones, elección de fecha de siembra y cultivar, preparación de suelos (laboreos, duración de barbechos), densidades de siembra y controles de malezas, plagas, enfermedades y riego (Andrade y Sadras, 2000).

### 1.2. LA PRODUCCIÓN DE SOJA EN EL URUGUAY

La agricultura nacional se ha modificado significativamente en los últimos años, no solo en la superficie asignada, la cual se ha multiplicado aproximadamente por cuatro entre 2000 y 2011, DIEA-MGAP (2012), sino en sus características principales desde una actividad que era mayoritariamente invernal, para el consumo interno y desarrollada en sistemas productivos integrados por cultivos y pasturas, se ha transformado en una actividad principalmente estival, orientada mayoritariamente a la exportación y con un porcentaje elevado de la superficie realizado en agricultura continua. (Giménez, 2012).

A partir del año 2000, se comienza a desarrollar y a imponer un nuevo modelo de agricultura empresarial que desplaza a la agricultura tradicional. Estos emprendimientos implantaron sistemas agrícolas continuos y relegaron a la ganadería a las zonas menos aptas para la agricultura. La superficie de cultivos creció continuamente, por intensificación en el área agrícola tradicional y expansión hacia otras zonas del país. Se abandonó el sistema de rotación de cultivos y pasturas y se incorporaron zonas con potencial agrícola, tradicionalmente ganaderas, a un sistema de agricultura continua (Ernst, 2009). Según Arbeletche y Gutiérrez (2011), a partir del año 2000 se generaron grandes cambios en el sector agrícola uruguayo, determinados principalmente por la expansión de la superficie de soja.

En estos 15 años el país pasó de sembrar 28.900 ha en 2000-01 a 1.050.000 ha en 2012-13 de soja, aumentando la producción de 66.700 toneladas a 2.765.000 toneladas en este período. La soja pasó a ser el principal cultivo agrícola extensivo; representando aproximadamente el 75% de la superficie sembrada de cultivos de verano (incluyendo el arroz y la caña de azúcar) y el 21 % de las exportaciones nacionales en dólares (DIEA-MGAP, 2014.)

Este crecimiento generó una fuerte concentración productiva ya que el incremento del área es explicado en un 89% por superficies de explotación de más de 1.000 hectáreas (Arbeletche *et al.*, 2012).

El crecimiento de la soja ha fortalecido un modelo productivo altamente tecnificado y mecanizado, con una producción comercial de mediana a gran escala con especial relevancia de los “pooles de siembra”, íntimamente ligada al mercado internacional, cuya demanda y buenos precios han sido determinantes en la expansión del cultivo.

Las principales herramientas tecnológicas utilizadas son la siembra directa, la utilización de agroquímicos y materiales genéticamente modificados (Arbeletche y Carballo, 2006).

Junto con las innovaciones tecnológicas (se dan importantes innovaciones en materia de organización de la gestión destacándose el incremento de la agricultura por contratos y redes relacionales que involucran a contratistas, productores, proveedores, procesadores y exportadores, esto permite la optimización del uso de los recursos y una disminución de los costos de transacción, complementado con una mejor gestión del riesgo (Arbeletche *et al.*, 2012).

### 1.3. DESARROLLO DEL CULTIVO DE SOJA

La escala fenológica desarrollada por Fehr y Caviness (1977) es la más utilizada para la descripción de los estadios fenológicos externos del cultivo, donde se distinguen dos etapas principales; una que describe los estadios vegetativos y se representa con la letra V y la otra los estadios reproductivos simbolizados con la letra R.

#### 1.3.1. Estadios vegetativos

VE – Emergencia. La germinación es una fase crítica del cultivo donde la humedad del suelo, la temperatura y la profundidad de siembra son determinantes en la supervivencia de las plántulas y el éxito en la implantación (Kantolic *et al.*, 2003).

La emergencia del cultivo puede producirse en un rango de 3 a 15 días luego de la siembra dependiendo de la humedad y de la temperatura del suelo, de la profundidad y la fecha de siembra (FS). En esta etapa se observa el hipocótilo en forma de arco, empujando al epicótilo y a los cotiledones, haciéndolos emerger sobre la superficie del suelo (Andrade y Sadras, 2000).

VC - Etapa cotiledonar. En esta etapa el hipocótilo se endereza y cesa su crecimiento. Los cotiledones se despliegan totalmente en el nudo cotiledonar (nudo 0), las reservas de los cotiledones cubren las necesidades de las plántulas hasta unos 7-10 días luego de VE. La expansión de las hojas

comienza después que los cotiledones han alcanzado la superficie del suelo. Las dos primeras hojas son unifoliadas y con filotaxia opuesta, pero todas las siguientes son trifoliadas y alternas (Kantolic *et al.*, 2003).

A partir de aquí los sucesivos estadios vegetativos se identifican por el número de nudos en el tallo principal con hojas trifoliadas totalmente desarrolladas, es decir con folíolos totalmente desplegados.

V1-1<sup>er</sup> nudo. El par de hojas opuestas unifoliadas están expandidas totalmente (nudo 1), y en el nudo inmediato superior se observa que los bordes de cada uno de los folíolos de la primer hoja trifoliada no se tocan (nudo 2). Es decir que en el estadio V1 se debe observar el par de hojas unifoliadas desarrolladas y la primera trifoliada expandiéndose.

Vn. La hoja trifoliada del nudo (n) está expandida totalmente y en el nudo inmediato superior los bordes de cada uno de los folíolos no se tocan.

El número de nudos por planta es variable y está directamente relacionado con el hábito de crecimiento. Las variedades con crecimiento indeterminado o semideterminado presentan superposición de fases vegetativas y reproductivas alcanzando mayor cantidad de nudos por planta, ya que bajo situaciones fuertemente inductivas el meristema apical mantiene la capacidad de generar hojas (Andrade *et al.*, 2000).

### 1.3.2. Estados reproductivos

R1 - Inicio de Floración. En este estadio se observa una flor abierta en cualquier nudo del tallo principal. El inicio floral está controlado por el fotoperiodo, la temperatura y el genotipo. El primer meristema en florecer ocupa generalmente una posición central del tallo (entre tercer y sexto nudo, dependiendo del estado vegetativo al inicio de floración). La floración progresa en el tallo principal hacia los nudos superiores e inferiores simultáneamente y en ramificaciones desde la base hacia el ápice. La aparición de nuevas flores alcanza su máximo entre R2 – R3 y está casi

completa en el estadio R5. (Baigorri, 2009). La aparición de hojas continua por varios días después de R1, ésta superposición es más pronunciada en genotipos indeterminados (Andrade *et al.*, 2000).

R2 - Floración completa. Se observa una flor abierta en uno de los nudos superiores del tallo principal con hojas totalmente desplegadas. Esta etapa indica el comienzo de un período de acumulación diaria y constante de materia seca y nutrientes que continuará hasta poco después de R6, asimismo se incrementa rápidamente la tasa de fijación biológica de nitrógeno (FBN) por parte de los nódulos (Andrade *et al.*, 2000).

R3 - Inicio de formación de vainas. Una vaina de 5 milímetros de largo en uno de los 4 nudos superiores del tallo principal, y con hojas totalmente desplegadas. La formación de vainas se inicia en los nudos inferiores, en este momento en la misma planta se encuentran vainas formándose, flores marchitas, flores abiertas y pimpollos (Baigorri, 2009).

R4 - Vainas completamente desarrolladas. El indicador es una vaina de 2 cm en uno de los 4 nudos superiores del tallo principal con hojas totalmente desplegadas. Algunas de las vainas de los nudos inferiores del tallo principal han alcanzado su máximo tamaño, pero en general la mayoría lo logra en R5 (Baigorri, 2009).

R5 - Inicio de formación de semillas. El indicador es una vaina, ubicada en uno de los 4 nudos superiores del tallo principal, contiene una semilla de 3 mm de largo. En esta etapa se alcanzan los máximos valores de altura de planta, número de nudos y área foliar. Las semillas inician un período rápido de acumulación de biomasa y nutrientes (Kantolic *et al.*, 2003).

R6 - Semilla completamente desarrollada. Una vaina, en cualquiera de los 4 nudos superiores del tallo principal, contiene una semilla verde que llena la cavidad de dicha vaina, con hojas totalmente desplegadas.

R7 - Inicio de maduración. Se inicia con la presencia de al menos una vaina con la coloración característica de madurez, marrón pajizo y se concentra en pocos días (5 a 10). En esta etapa se acelera bruscamente la senescencia foliar (en sentido acrópeto) al mismo tiempo que cesa la acumulación de peso seco en grano y disminuye el contenido de humedad (Kantolic *et al.*, 2003).

R8 - Maduración completa. El 95 % de las vainas de la planta han alcanzado el color de madurez. Se completa el ciclo ontogénico, culminando con la maduración iniciada en la etapa anterior.

### 1.3.3. Período crítico de determinación del rendimiento

El período crítico (PC) de determinación del rendimiento se define como la etapa del ciclo fenológico de un cultivo, en la que se determina en mayor medida el componente principal de rendimiento (Giménez, 2007).

Los factores abióticos durante el PC que generan restricciones hídricas, deficiencias nutricionales, sombreado, así como los factores bióticos como daño por insectos, enfermedades y competencia por malezas que generen disminuciones en las tasas de crecimiento, explican en mayor medida las disminuciones del rendimiento.

En general variaciones en el número de granos por superficie reflejan las mayores modificaciones del rendimiento final, mientras que cambios en el peso de grano no siempre se reflejan en el rendimiento. Por lo que se puede afirmar que el principal componente del rendimiento en soja es el número de granos por superficie (Kantolic *et al.*, 2003).

El número de granos por planta se determina principalmente durante la fijación de vainas (R3-R6), y es función de la tasa de crecimiento por planta en esta etapa (Vega *et al.* 1997, citados por Andrade *et al.*, 2000); esto coincide con lo propuesto por Kantolic y Slafer (2003), quienes afirman que



la supervivencia de vainas es el principal componente de ajuste del número de granos y está fuertemente asociada con la disponibilidad de asimilados.

Las etapas reproductivas tempranas no representan el periodo más crítico. Esto se da como consecuencia de la posibilidad de que aparezcan nuevas hojas luego del comienzo de floración, sumado a la gran cantidad de sitios potenciales donde se diferencian flores y lo extenso del período de floración (Kantolic *et al.*, 2003). Limitaciones posteriores, principalmente en la etapa R4.5-R5.5 producen reducciones mayores en el número de granos por planta (por aborto de flores, de vainas chicas y disminución de número de granos en las vainas) no existiendo posibilidad de compensaciones por mayor peso del grano.

Por otra parte, si las condiciones adversas se producen entre R6-R6.5, se acortará el período de llenado y por ende se obtendrán granos más livianos. Si el mismo estrés se produce entre R6,5-R7 el grano ya acumuló gran proporción de su peso final y por esto no hay grandes efectos sobre el rendimiento (Sadras *et al.*, 2000).

El manejo de fechas de siembra (FS) y elección de variedades puede resultar una medida de gran importancia para ubicar el PC en condiciones favorables para el cultivo (Giménez, 2007).

#### 1.3.4. Hábitos de crecimiento

La planta de soja puede presentar tres tipos de hábitos de crecimiento (HC):

HC determinado. En este tipo de variedades una vez que se inicia R1 finaliza prácticamente su crecimiento en altura desarrollando ramas laterales y culminando la producción de nudos en el tallo principal, formándose en su extremo apical un ramillete floral. En las variedades de crecimiento determinado puede haber hasta un 20% de la duración del ciclo en que ocurra superposición entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo. Las variedades determinadas florecen a partir de la porción media del tallo

principal, una gran parte de las variedades de los GM VI, VII y VIII tienen este tipo de HC.

HC indeterminado. En este tipo de HC luego de la etapa R1 la planta continúa diferenciando nudos en el tallo principal, donde es posible que dicho número se duplique luego de la floración; en el 40% o más del ciclo puede haber superposición entre crecimiento vegetativo y reproductivo. Estas variedades florecen a partir de la porción basal del tallo principal. Otra característica de este tipo de HC es que puede haber gran diferencia de tamaño entre las vainas basales respecto de las apicales. Sin embargo todas maduran al mismo tiempo, debido a que los granos de las vainas apicales tienen altas tasas de crecimiento. La mayoría de los GM II, III, IV, V y algunos materiales de los GM VI y VII tienen este tipo de HC.

HC semideterminado. En las variedades semideterminadas los tallos continúan creciendo vegetativamente luego de iniciado R1 (característica propia del HC indeterminado) para luego terminar en un ramillete floral como los de HC determinados, con un número intermedio de nudos con respecto a los de HC indeterminados y determinados. Algunos materiales de los GM VI y VII tienen este tipo de HC.

#### 1.4. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO Y EL DESARROLLO

Las características climáticas del ambiente de producción en que se desarrollan los cultivos son las que determinan el rendimiento alcanzable. Con respecto a esto la radiación solar, la temperatura del ambiente y la disponibilidad hídrica son los principales factores ambientales que regulan los procesos metabólicos de las plantas (Cárcova *et al.* 2003, Gerster y Bacigaluppo 2009, Canfalone *et al.* 2002).

La temperatura y el fotoperiodo son los factores ambientales que determinan la duración de las fases de desarrollo de la soja, actuando en forma simultánea y con evidencia de interacción entre ellos (Kantolic *et al.*, 2003).

Aunque existen evidencias también de que además de la temperatura y el fotoperiodo otros factores del ambiente como la fertilidad del suelo y/o la disponibilidad hídrica pueden modificar el crecimiento y la tasa de desarrollo del cultivo (Kantolic *et al.*, 2003).

#### 1.4.1. Temperatura

La temperatura ejerce una regulación compleja de la mayoría de los procesos de desarrollo y crecimiento de la soja. La duración de una fase (habitualmente medida en días) depende de la temperatura, siendo ésta determinante en la duración de cada uno de los distintos estados fenológicos del cultivo. La relación entre la duración de una fase y la temperatura no es lineal, por ello se prefiere caracterizar la longitud de una etapa a través de su inversa. Esta función inversa de la duración se llama tasa de desarrollo y su unidad es 1/día. En términos generales esta tasa aumenta linealmente entre la temperatura base (temperatura por debajo de la cual no hay desarrollo) y la óptima donde se incrementa la velocidad con que se cumple cada etapa; entre la temperatura óptima y la temperatura máxima la tasa disminuye. Por debajo de la temperatura base y por encima de la máxima el desarrollo prácticamente se detiene (Sadras *et al.*, 2000).

La temperatura base varía entre 6 y 10°C; las temperaturas óptimas diurnas para fotosíntesis están comprendidas entre los 25 y 30 °C mientras que temperaturas superiores a la óptima enlentecen el crecimiento hasta detenerlo por encima 40°C (Kantolic *et al.*, 2003). Las temperaturas óptimas nocturnas para crecimiento se encuentran entre los 21 y 27 °C.

La temperatura influye sobre todo en el ciclo del cultivo, pero las etapas fenológicas más afectadas en su longitud por las temperaturas son las reproductivas (Giménez, 2007). En etapas reproductivas la fijación de vainas se retrasa con temperaturas inferiores a 22°C, mientras que cesa por debajo de los 14°C (Sadras *et al.*, 2000).

En Uruguay las temperaturas medias durante el verano (diciembre-enero-febrero) se encuentran en el orden de 23 °C, representando un aumento de 6 °C respecto al valor medio estacional de la primavera. Las mismas oscilan entre los 24,7 °C (Artigas y Salto) y 21,3 °C (Rocha). Las temperaturas máximas medias son del orden de 29 °C con una distribución descendente en sentido norte – sur, oscilando entre un valor máximo de 31,2 °C en Artigas y un valor mínimo en Carrasco y Colonia con 27 °C. Las temperaturas mínimas medias son de 17 °C, presentando su mayor valor en Artigas con 18,7 °C y el mínimo en Rocha con 15,5 °C (DNM-MDN, 2014).

En términos generales en el país no existen limitantes en las temperaturas requeridas en las distintas etapas del cultivo de soja, 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.

#### 1.4.2. Fotoperiodo

La soja es una especie que responde cuantitativamente al acortamiento del día (Sadras *et al.* 2000, Kantolic *et al.* 2003).

El fotoperiodo es el principal factor que influye en los eventos reproductivos como la iniciación floral, la floración, la fructificación y el llenado de granos, definiendo el momento de inicio y fin de cada una de estas fases, así como la tasa a la que progresan los cambios dentro de las plantas (Kantolic *et al.*, 2003).

A diferencia de la temperatura que influye durante todo el ciclo del cultivo, la mayoría de los genotipos presentan una corta fase juvenil o pre inductiva donde la inducción floral puede ocurrir en cualquier estadio después del desarrollo de las hojas unifoliadas. Se puede asumir que a partir de la expansión de las primeras hojas trifoliadas, la planta comenzaría a ser sensible al estímulo fotoperiodico, y ésta respuesta se prolonga hasta el estado de madurez fisiológica. Por lo tanto el fotoperiodo regula el desarrollo desde V1-V2 hasta R7 (Sadras *et al.*, 2000).

El fotoperiodo a partir del cual se induce la floración, como la sensibilidad al mismo presentan una gran variación genotípica, los GM más cortos presentan requerimientos de fotoperiodos mayores y poseen en general menor sensibilidad a este factor y a medida que aumenta el GM disminuyen los requerimientos del largo del día y aumenta la sensibilidad al fotoperiodo (Kantolic *et al.* 2003, Giménez 2007).

En el país la heliofanía real media presenta una variación espacial mínima con una tendencia creciente en dirección sureste-noroeste, producto de una menor nubosidad y humedad relativa en promedio sumado a una mayor radiación astronómica por su menor latitud (Castaño *et al.*, 2010).

El promedio de horas de radiación solar media diaria sobre el país se sitúan en 7 horas con los menores valores situados al sureste (Rocha) y los máximos al noroeste (Salto y Artigas) (Castaño *et al.*, 2010). Mientras que en verano, la radiación solar media es mayor, llegando a tener una duración de 14 horas, el día más largo del año (solsticio de verano “21 de Diciembre”) (Durán, 1986).

Para la mayoría de los GM utilizados en Uruguay (GM intermedios a largos VI y VII), es de esperar que induzca la floración después del 21 de diciembre, cuando los días comienzan a acortarse. Este comportamiento se justifica porque estos GM inducen la floración cuando las horas de luz son inferiores a 14 horas aproximadamente, existiendo variaciones entre cultivares. Mientras que para los GM cortos (III, IV y V), pueden esperarse floraciones previas al 21 de diciembre con los días alargándose, ya que tienen un umbral de fotoperiodo mayor que los de ciclo más largo y en estos grupos es la temperatura el principal factor que determina el pasaje de estado vegetativo a reproductivo, floreciendo independientemente del fotoperiodo (Giménez, 2007).

### 1.4.3. Disponibilidad hídrica

La soja es un cultivo altamente sensible a las deficiencias hídricas y es la principal limitante para expresar los rendimientos potenciales que posee el cultivo (Farias *et al.* 2006, Giménez 2012). Esto se debe a los efectos directos que causa la falta de agua en el crecimiento y a los efectos indirectos en la FBN ésta se ve afectada negativamente por condiciones de estrés hídrico (Santos 2009, Giménez 2012).

Los efectos del estrés hídrico sobre la fenología de la soja dependen no solo de características tales como duración y severidad, sino también del momento de ocurrencia relativo al ciclo de desarrollo del cultivo (Desclaux y Roumet, 1996).

En las condiciones de producción del país las deficiencias hídricas son la principal limitante ambiental para la obtención de rendimientos potenciales en soja (Agorio *et al.* 1988, Sawchik y Ceretta 2005, Giménez y García 2011, Giménez 2012).

Según Giménez (2012) la disponibilidad hídrica de los cultivos de verano está determinada por la influencia de tres factores relacionados a la oferta y demanda de agua para los cultivos: demanda atmosférica, capacidad de almacenamiento de agua disponible (CAAD) en el suelo y recargas de agua de los suelos provenientes de las precipitaciones (PP).

#### 1.4.3.1. Demanda atmosférica – evapotranspiración de referencia

El concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) se introdujo para estudiar la demanda atmosférica o demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo (Doorenbos y Pruitt, 1977). Los factores que afectan la ET<sub>o</sub> son los parámetros climáticos, fundamentalmente la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento (Doorenbos y Pruitt 1977, Allen *et al.* 1998, Cai *et al.*

2007, Pereira *et al.* 2015). Por lo tanto, la ETo puede ser calculada a partir de datos meteorológicos.

La ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específica, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo (Allen *et al.*, 1998).

La ETo se define como la evapotranspiración de la superficie hipotética de referencia, la que se asemeja a una superficie extensa de una gramínea verde de una altura uniforme de 0,12 m, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra, que posee resistencia superficial fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0,23 y con un adecuado aporte de agua (Smith 1991, Allen *et al.* 1998, Allen *et al.* 2006, Pereira *et al.* 2015).

Varias ecuaciones se han utilizado para estimar la evapotranspiración de referencia. El modelo universalmente más aceptado es el propuesto por Penman-Monteith-FAO 56 (Jensen *et al.* 1990, Allen *et al.* 1998, Allen *et al.* 2006, Pereira *et al.* 2015).

La ecuación FAO-PM para calcular ETo es:

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

La  $R_n$  es la radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $G$  es la densidad de flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura del aire a 2 m de altura ( $^{\circ} \text{C}$ ),  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  es la presión de vapor del aire a la saturación (kPa),  $e_a$  es la presión de vapor real (kPa),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), y  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).  $G$  puede ser ignorado para cálculos de paso de tiempo diario.

En la actualidad, en general las estaciones meteorológicas automáticas estiman el valor de la ETo (García, 2012). La ETo se puede utilizar para

caracterizar el clima local o como un componente de los índices de sequía donde se contrasta con las PP (Pereira *et al.*, 2015).

Según Castaño *et al.* (2010) los valores medios de ETo acumulada anual en el país, 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. A su vez, la ETo presenta un claro comportamiento estacional registrándose los valores más altos durante el verano con promedios mensuales del orden de 160-185 mm, seguidos de la primavera con registros promedios de 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).

Giménez (2012) sugiere que en el país en los cultivos de verano la estación de crecimiento se ve limitada por las temperaturas y esto provoca que las etapas de mayor jerarquía en la determinación del rendimiento se ubiquen principalmente en los meses de mayor demanda evaporativa atmosférica.

#### 1.4.3.2. Capacidad de almacenamiento de agua disponible

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 (García, 2012).

El contenido total de agua del suelo no es totalmente utilizable o no está fácilmente disponible para las plantas. Se define el agua disponible (AD) como la diferencia entre el contenido de agua de un suelo a capacidad de campo (CC) y el contenido de agua en el punto de marchitez permanente (PMP) (García, 2012).

La CC se define como la cantidad de agua máxima que el suelo puede retener, medido a las 48 horas después de una lluvia o riego. Es el contenido de agua de un suelo inicialmente saturado luego de que el agua gravitacional ha drenado, el espacio de los macroporos está ocupado por



aire y el de los microporos por agua (el contenido de agua continúa descendiendo a medida que pasa el tiempo (García, 2012).

El PMP se define como el límite inferior de disponibilidad de agua en el suelo. Es el límite hasta el cual una planta mesófito, puede extraer agua (García, 2012).

Molfino y Califra (2001) indican que casi un 30% de la superficie de nuestro territorio posee tierras con muy baja (menor a 40 mm) y baja (entre 40 y 80 mm) CAAD. Es importante destacar que la CAAD varía entre 80 y 160 mm en la mayor parte de los suelos agrícolas del país. Esta CAAD representa aproximadamente un cuarto a un tercio del consumo de agua del cultivo de soja (Sawchik y Ceretta, 2005).

#### 1.4.3.3. Precipitaciones

En cultivos de secano, las PP son la principal fuente de entrada o recarga de agua al suelo. Dada la escasa CAAD de los suelos es notoria la elevada dependencia de las recargas hídricas para lograr un abastecimiento ajustado a las demandas de los cultivos y en secano las recargas provienen fundamentalmente de las PP (Giménez y García, 2011).

El régimen de PP del país, se clasifica como isohigro y presenta volúmenes anuales promedio de 1.000 mm en el sur a 1.400 mm en el norte del territorio, con una distribución uniforme en el año (Genta y Texeira, 2001).

En la medida que se consideren los volúmenes acumulados de las PP a través del año, no existen estaciones secas, ni lluviosas, bien definidas, registrándose acumulados medios entre 60 (litoral oeste en invierno) y 140 mm por mes (noroeste en abril y octubre) (DNM-MDN, 2014).

Sin embargo, Genta y Failache (2010) indican una gran variabilidad interanual en cuanto a las PP en cualquier mes del año puede llover la media, no llover o llover cuatro veces la media. Esta variabilidad es mayor en

los meses de verano en los cuales la desviación es siempre mayor a la media.

### 1.5. IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CULTIVO DE SOJA

El potencial de rendimiento de un cultivo está sujeto a diversos factores relacionados con el sistema suelo, planta y clima, existe una relación funcional entre estos factores y la producción de cultivos, característica de cada condición ambiental (Giménez, 2010).

Otegui (2009) indicó que en ausencia de estreses bióticos y abióticos 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 CO<sub>2</sub> como un recurso de oferta constante por parte de la atmósfera y no sujeto a modificaciones significativas en el corto plazo).

En soja 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 y Croatto, 2000).

Diversos autores coinciden que en las condiciones de producción del país las deficiencias hídricas son la principal limitante para la obtención de rendimientos potenciales en el cultivo de soja (Agorio *et al.* 1988, Sawchik y Ceretta 2005, Giménez y García 2009, Giménez 2012).

Por lo que conocer el efecto de las deficiencias hídricas sobre la fisiología de la soja, nos permite orientar el manejo para atenuar las pérdidas de rendimiento y calidad causadas por la situación de estrés hídrico o sequías temporales (Agorio *et al.* 1988, Giménez 2012).

### 1.5.1. Producción de materia seca

En el cultivo de soja el rendimiento es función directa de la producción de materia seca (MS) durante el desarrollo del cultivo (Mondino y Gómez, 2006).

Para lograr altas producciones de MS en una estación de cultivo se necesitan una adecuada disponibilidad hídrica, 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, 2000).

En este sentido Dardanelli *et al.* (2003), Andrade y Sadras (2000) indican que contenidos de agua en el suelo en la zona de exploración radicular por debajo del 40-60% del AD, disminuyen el consumo de agua y por lo tanto el crecimiento de los cultivos.

Andrade y Sadras (2000) sugieren que la disminución en la producción de MS en cultivos sometidos a deficiencias hídricas puede deberse a una reducción en la interceptación de radiación y/o a una disminución en la eficiencia de conversión de radiación interceptada en MS. La reducción en la radiación interceptada es consecuencia de una menor expansión de hojas y/o una mayor senescencia foliar; mientras que la reducción de la eficiencia de conversión se debe a un descenso en la tasa fotosintética por unidad de área foliar. Aunque la expansión de los tejidos es mucho más sensible que el proceso de fotosíntesis, al déficit hídrico (Andrade y Sadras, 2000).

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.

Según Otegui (2009) los factores ambientales de la región de producción y las características del cultivo como el GM afectan la fotosíntesis y la transpiración, y por ende la producción de MS. 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.

Andrade y Sadras (2000) obtuvieron una producción de MS en todo el ciclo del cultivo de aproximadamente  $12 \text{ t ha}^{-1}$ , en ensayos conducidos bajo riego en Argentina. Valentinuz 1996, citado por Andrade y Sadras (2000) en experimentos conducidos bajo riego en la localidad de Balcarce, obtuvieron una producción de  $9,7 \text{ t ha}^{-1}$  de MS, para una densidad de  $30 \text{ plantas m}^{-2}$ .

Canfalone *et al.* (2002) en un experimento realizado en Buenos Aires lograron resultados de producción de  $23 \text{ t ha}^{-1}$  de MS en el tratamiento regado, mientras que en el tratamiento sin riego el máximo alcanzado fue de  $13,8 \text{ t ha}^{-1}$  de MS.

Giménez (2010) en Paysandú, reportó producciones de MS aérea depositada durante las etapas R2 y R6 de soja, de  $5.700 \text{ kg ha}^{-1}$  en un tratamiento de bienestar hídrico y  $2.200 \text{ kg ha}^{-1}$  en un tratamiento con deficiencias hídricas durante el período crítico (R4-R6), período que se destaca por el crecimiento del cultivo.

Dos Santos (2007) reportó que en un experimento donde se evaluaron diferentes estrategias de riego, el tratamiento donde se aplicaron 120% de disponibilidad con respecto a la ETo fue el que presentó menor IAF, ese hecho fue explicado porque el exceso hídrico causó reducciones en el crecimiento.

#### 1.5.2. Tasa de crecimiento del cultivo

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) que es la biomasa acumulada por unidad de superficie y por unidad de tiempo resulta del balance entre la fotosíntesis (ganancia de  $\text{CO}_2$ ) y la respiración (pérdida de  $\text{CO}_2$ ). Como la fracción de carbono fijado que se destina a la respiración es relativamente constante, aumentos en la radiación interceptada por el cultivo se traducen

en aumentos en la tasa de crecimiento. La radiación interceptada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la eficiencia de intercepción de la misma (Cárcova *et al.*, 2003).

En la medida que ocurran deficiencias hídricas, las TCC disminuyen dado que se cierran los estomas para evitar más pérdidas de agua y por ende se reduce la transpiración de las plantas, así como el intercambio gaseoso a nivel estomático, lo cual impide la fijación normal del CO<sub>2</sub> afectando negativamente el crecimiento vegetal (Andriani *et al.*, 1991).

El crecimiento es el resultado de la división y la expansión celular, éste se ve afectado por la reducción de la transpiración y la fotosíntesis, al exponer a la planta a situaciones de estrés, por ejemplo períodos de déficit hídrico. La caída de la tasa fotosintética, reduce la eficiencia de conversión de la radiación y la producción de granos (Andrade y Sadras, 2000).

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 (Mondino y Gómez, 2006). 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 (Andrade y Sadras 2000, Karam *et al.* 2005).

Como se mencionó anteriormente, para lograr altos niveles de TCC en un determinado periodo se debe tener altos niveles de IAF, adecuada disponibilidad hídrica y radiación solar (Andrade y Sadras 2000, Modali 2004).

Modali (2004) indicó que el rendimiento de soja puede ser aumentado minimizando el estrés ambiental que enlentece la TCC entre emergencia y comienzo de llenado de granos (R5).

Las elevadas TCC durante el PC generan un mayor número de granos a cosecha por medio de un número de vainas por área superior, generando

una combinación de aumento de nudos reproductivos y vainas por nudos (Board y Modali, 2004).

Según Frederick *et al.* (2001), Modali (2004) los efectos negativos del déficit hídrico sobre la TCC sólo tienen impacto en el rendimiento cuando la planta alcanza el estado reproductivo.

La TCC durante el período comprendido entre las etapas de floración y llenado de granos tiene una relación directa lineal sobre el número de granos, principal componente de rendimiento (Vega y Andrade 2000, Frederick *et al.* 2001, Kantolic *et al.* 2003, Modali 2004).

### 1.5.3. Deficiencias hídricas

El estrés hídrico es considerado uno de los factores más importantes que limitan el crecimiento y el rendimiento de las plantas en el mundo (Boyer, 1982). El déficit hídrico es causado por la falta de agua disponible para las plantas, lo cual se genera por escasez de PP y/o alta demanda atmosférica, suelos poco profundos, con baja capacidad de retención de agua o con impedimentos para la penetración radical. Las tres características del déficit que determinan su efecto sobre el cultivo son: la intensidad, la duración y el momento de ocurrencia en relación al estado del cultivo (Andrade y Sadras 2000, Sawchik y Ceretta 2005). Cuando las deficiencias hídricas son pronunciadas y duraderas, se genera en la planta una situación de estrés hídrico que afecta su normal funcionamiento. 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 Ceretta, 2005).

García y Ferrarotto (2009), Giménez (2010) 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.

Según Andriani (2002) existen tres sub-períodos 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 (VE-R1). El comprendido entre inicio de floración e inicio de llenado de granos (R1-R5). Y el último que corresponde al llenado de granos (R5-R7).

Si bien en la etapa de plántula la demanda de agua es baja, 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). En este período deficiencias hídricas de mediana intensidad 40-50% de AD en el suelo si bien pueden disminuir el área foliar y la altura de la planta, no producen reducciones en el rendimiento en grano. Las intensidades mayores (contenidos entre 20 y el 40 % de AD) podrían producir reducciones en rendimiento en semilla del orden del 10% (Andriani, 2002).

El cultivo en los estadios vegetativos posee alta plasticidad la cual se reduce en etapas reproductivas (Baigorri y Croatto, 2000). Cuando el estrés ocurre durante emergencia de nudos se retrasa la aparición de nuevos nudos y se apresura la formación de órganos reproductivos en estos nudos (Desclaux y Roumet, 1996).

A partir de la floración aumentan las necesidades hídricas (Mambrin *et al.*, 2005). 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 grano del orden del 10 % y deficiencias severas de un 20 % o más. La reducción del rendimiento se debe al aborto de flores y de vainas que disminuyen el número final de estas últimas, siendo en parte compensados por el peso del grano, si cesa la deficiencia hídrica en la etapa siguiente.

Según Sionit y Kramer (1977), plantas bajo estrés durante la formación de flores tienen períodos de floración más cortos. En condiciones de estrés el desarrollo reproductivo de los primeros órganos iniciados detiene el establecimiento de los órganos tardíos, sugiriendo que los asimilados se concentran en los órganos más viejos en detrimento de los nuevos (Desclaux y Roumet, 1996).

En soja la alta producción de flores y el extenso período de la floración le permite escapar a cortos períodos de estrés. La incidencia de estrés entre R1-R3 no produce importantes pérdidas de rendimiento ya que la floración se prolonga hasta R5. Por ese motivo se puede compensar total o parcialmente debido a la fijación de nuevos frutos, más granos por fruto, y/o por la producción de granos más pesados, una vez aliviado el estrés (Andriani *et al.* 1991, Andrade *et al.* 2000, Baigorri y Croatto 2000, Kantolic *et al.* 2003).

El período más crítico de determinación del rendimiento en soja ocurre durante las etapas finales de fructificación y de llenado de grano, en las etapas entre R4-R6 o sea en etapas reproductivas avanzadas, esto determina que las posibilidades de compensación posteriores en el ciclo, sean escasas. Por lo que la ocurrencia de cualquier tipo de estrés reducirá el rendimiento, más que si el mismo ocurre en cualquier otra etapa (Andriani *et al.* 1991, Baigorri y Croatto 2000, Andriani 2002, Giménez 2012).

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

Desclaux y Roumet (1996) reportaron que el estrés hídrico durante etapas reproductivas tardías aceleraba la senescencia, reduciendo la duración del período de llenado de granos y por lo tanto el peso de los mismos.

Sadras *et al.* (2000) indicaron que si el déficit se produce entre R6-R6.5, se acortará el período de llenado y por ende se obtendrán granos más livianos.



Si el mismo estrés se produce entre R6.5-R7 el grano ya acumuló gran proporción de su peso final y por esto no hay grandes efectos sobre el rendimiento.

#### 1.5.4. Rendimiento

El rendimiento potencial es el mayor rendimiento que se puede obtener en un ambiente de producción con determinado genotipo. Se encuentra determinado por factores no modificables del ambiente como la radiación solar, las temperaturas y los suelos. Así como por factores de manejo modificables como el arreglo espacial y la fecha de siembra. Se determina en ausencia de factores limitantes como la disponibilidad de agua, nutrientes y factores reductores del rendimiento como los daños causados por plagas, malezas y enfermedades (Giménez, 2012).

Andriani *et al.* (1991) demostraron que los déficits hídricos durante las etapas R1-R4, no tuvieron efectos en el rendimiento, sin embargo cuando el déficit se situó entre R4-R6.3 sí afectó sustancialmente el rendimiento. Los componentes del rendimiento que se vieron afectados fueron el número de vainas, el número de granos por vaina y el peso de los granos.

Dogan *et al.* (2007) estudió el efecto del estrés hídrico en diferentes etapas reproductivas de soja para las condiciones climáticas semiáridas de Turquía. Sus resultados mostraron que cuando el déficit hídrico se impuso durante las etapas R3, R5, y R6 resultó en una reducción sustancial de rendimiento en comparación con el tratamiento de riego completo.

A nivel nacional, Giménez (2010) y Giménez (2012) evaluó diferentes disponibilidades hídricas en el PC (R4 a R6) y en etapas no críticas (ENC). Las deficiencias de agua en el PC representaron una disminución del rendimiento aproximada a 50%. Esta respuesta fue explicada por la fijación de un menor número de grano  $m^{-2}$  en los tratamientos con deficiencias hídricas en el PC, mientras que no hubo diferencias en el peso de los granos entre tratamientos.

El rendimiento es función directa del número de granos fijados por superficie (Andriani *et al.* 1991, Cirilo *et al.* 1992). El número de granos  $m^{-2}$  depende directamente de la TCC durante el PC de determinación del rendimiento (Kantolic *et al.*, 2003). Por lo tanto, para obtener elevados rendimientos en grano, se requieren ambientes con buena disponibilidad de agua, así como disponibilidad de nutrientes, radiación solar y temperaturas ajustadas a los requerimientos del cultivo.

#### 1.6. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS

La cantidad de agua requerida para compensar las pérdidas por evapotranspiración (ET) se define como las necesidades de agua de los cultivos. A pesar de que los valores de la ET del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o PP, mientras que la ET del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la ET (Doorenbos y Pruitt 1977, Allen *et al.* 1998).

Se considera a la ET como la pérdida de agua por evaporación del suelo y por transpiración de las plantas. La misma está determinada por factores meteorológicos, edáficos y propios del cultivo. (Penman 1948, Allen *et al.* 1998).

La ET se expresa normalmente en mm por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, un día, 10 días, un mes o incluso un ciclo de un cultivo o un año (Doorenbos y Pruitt, 1977).

El concepto de ET incluye tres diferentes definiciones: ETo (la cual fue definida en el punto 1.4.3.1.), ET del cultivo bajo condiciones estándar (ETc), y ET del cultivo bajo condiciones no estándar (ETc aj) (Allen *et al.*, 1998).

### 1.6.1. Evapotranspiración del cultivo

La ETc para FAO Allen *et al.* (1998) refiere a la ET cuando el cultivo se encuentra bajo óptimas condiciones de suelo, agua y manejo y alcanza el rendimiento potencial.

La ETc representa la mayor tasa a la que puede evapotranspirar un cultivo en determinado ambiente, por lo que también se suele llamar como ET máxima (Giménez y García, 2011). La ET máxima (ETm) o ETc sólo es afectada por aspectos del cultivo y de la demanda atmosférica, ya que se asume un suministro óptimo de agua del suelo (Doorenbos y Kassam, 1979).

El consumo máximo de agua o ETc, se estima mediante un cálculo de dos pasos, según la metodología recomendada por la FAO Doorenbos y Pruitt (1977) y más tarde adoptada por varios investigadores (Allen *et al.* 1998, Pereira 2004, Pereira y Alvez 2005, Pereira *et al.* 2010). En primer término se calcula la ETo, luego se determina el coeficiente de cultivo (Kc) y finalmente se calcula la  $ETc = ETo \times Kc$ .

Mientras la ETo como ya se mencionó representa un indicador de la demanda atmosférica, el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo y sólo en una pequeña proporción en función del clima (Allen *et al.*, 1998).

La ETc será diferente a la ETo en la medida en que su comportamiento energético y aerodinámico difieran de las correspondientes al cultivo de referencia (Pereira, 2004). Los efectos de las características que distinguen al cultivo del cultivo de referencia están incorporados en el Kc (Allen *et al.*, 1998).

### 1.6.2. Coeficiente del cultivo

El Kc es el cociente entre la ETc y la ETo, 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 (Doorenbos y Pruitt 1977, Allen *et al.* 1998, Pereira 2004).

-Altura del cultivo. La altura del cultivo tiene influencia en el valor de la resistencia aerodinámica ( $r_a$ ) de la ecuación de Penman-Monteith, así como en la transferencia turbulenta del vapor del agua desde el cultivo hacia la atmósfera. El término  $r_a$ , aparece en dos oportunidades en la versión completa de la ecuación de la FAO Penman-Monteith.

- Albedo (reflectancia) de la superficie del cultivo y del suelo, el valor del albedo está afectado por la porción del suelo cubierta por la vegetación, así como por la humedad presente en la superficie del suelo. El albedo de las superficies del cultivo y suelo afectan el valor de la radiación neta ( $R_n$ ) de la superficie, la  $R_n$  constituye la fuente principal de energía para el proceso de ET.

-Resistencia del cultivo. La resistencia del cultivo a la transferencia del vapor de agua está afectada por el área foliar (cantidad de estomas), edad y condición de la hoja, así como por el grado de control estomático. La resistencia de la vegetación tiene influencia en el valor de la resistencia de la superficie ( $r_s$ ).

-Evaporación que ocurre en el suelo, especialmente en la parte expuesta del mismo.

En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de  $K_c$ . Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectaran al valor del  $K_c$ . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la  $ET_c$ , los factores que afectan la ET en el suelo también afectaran al valor de  $K_c$  (Allen *et al.*, 1998).

#### 1.6.2.1. Etapas del crecimiento del cultivo

A medida que el cultivo se desarrolla, el área del suelo cubierta por la vegetación, la altura del cultivo y el área foliar varía. Debido a esto, el valor

de  $K_c$  también variará a lo largo del periodo de crecimiento del cultivo. El periodo de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada (Allen *et al.* 1998, Pereira 2004).

La variación del  $K_c$  a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva de  $K_c$ . Para describir y construir la curva del  $K_c$  se necesitan solamente tres valores de  $K_c$ , los correspondientes a la etapa inicial ( $K_c$  ini), los de la etapa de mediados de temporada ( $K_c$  med) y los de la etapa final ( $K_c$  fin) (Allen *et al.* 1998, Pereira 2004).

La etapa inicial para cultivos anuales va desde siembra hasta que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la fecha de siembra y del clima (Allen *et al.* 1998, Pereira 2004).

En la etapa inicial el área foliar del cultivo es menor y el componente principal de la  $ET_c$  es la evaporación del suelo. El valor de  $K_c$  durante la etapa inicial ( $K_c$  ini) depende del contenido de agua en el suelo. Por lo que durante esta etapa son determinantes las entradas de agua en relación a la frecuencia y la magnitud (lluvias o riego) y de la  $ET_o$  (Allen *et al.*, 1998, Pereira 2004).

La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta la cobertura efectiva completa o floración. A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convertirá en el proceso más importante (Allen *et al.* 1998, Allen *et al.* 2006).

La etapa de mediados de temporada o ciclo comprende el periodo de tiempo entre la cobertura completa o floración hasta el comienzo de la madurez. Durante la etapa de mediados de temporada, el  $K_c$  alcanza su valor máximo. El valor de  $K_c$  en esta etapa ( $K_c$  med) es relativamente constante. La

diferencias entre el valor de  $K_c$  med con respecto al valor de referencia 1, se deben a las diferencias en altura y resistencia aerodinámica entre el cultivo y la superficie del cultivo de referencia, y en menor medida a las diferencias en las condiciones climáticas (Allen *et al.* 1998, Pereira 2004, Pereira *et al.* 2010).

La etapa final de crecimiento comprende el periodo entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la senescencia completa. El estado de senescencia es generalmente asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas, lo que causa una reducción en el valor de  $K_c$ . El valor de  $K_c$  al finalizar la etapa final ( $K_c$  fin) refleja el efecto de las prácticas de manejo del cultivo y del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha, el valor de  $K_c$  final será alto (Allen *et al.*, 1998).

#### 1.6.2.2. Factores determinantes del coeficiente de cultivo

Allen *et al.* (1998) incluyen valores típicos de  $K_c$  ini,  $K_c$  med y  $K_c$  fin correspondientes a distintos cultivos. Los  $K_c$  presentados por Allen *et al.* (1998) son para determinadas alturas medias máximas de las plantas del cultivo y ciertas condiciones climáticas: cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ( $H_{Rmin} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ ). Como se mencionó anteriormente el valor de  $K_c$  varía principalmente en función de las características particulares del cultivo (principalmente la altura de planta), variando solo en una pequeña proporción en función del clima (Pereira 2004, Pereira *et al.* 2010, Pereira *et al.* 2015).

El  $K_c$  durante la etapa inicial “ $K_c$  ini” y de desarrollo del cultivo dependerán de la frecuencia de humedecimiento del suelo, por lo que se requerirá de ajustes al valor de  $K_c$  ini considerado. Para condiciones de humedecimiento frecuente tal como en los casos de riego de alta frecuencia o lluvias, los valores de  $K_c$  ini pueden ser incrementados sustancialmente; sin embargo cuando la superficie del suelo se mantiene seca, la evaporación será

restringida y el valor de  $K_c$  ini será pequeño (Allen *et al.* 1998, Liu *et al.* 1998, Chaterlán *et al.* 2010).

El valor del  $K_c$  ini depende del intervalo de tiempo entre eventos de humedecimiento, la magnitud del evento de humedecimiento y el poder evaporante de la atmósfera, el valor de  $K_c$  ini puede variar entre 0,1 y 1,15 (Allen *et al.*, 1998).

Cuando la altura de planta o área foliar varíen a las obtenidas bajo las condiciones propuestas por Allen *et al.* (1998) los  $K_c$  med y  $K_c$  fin, para la mayoría de cultivos, necesitarán de correcciones adicionales, debido a las diferencias en las propiedades aerodinámicas entre la superficie del cultivo con el cultivo de referencia.

#### 1.6.3. Evapotranspiración real del cultivo

La  $ET_c$  aj. refiere a la ET de cultivos que crecen y se desarrollan en condiciones no óptimas. En condiciones de campo la  $ET_c$  aj. puede ser menor que la  $ET_c$  y se suele llamar ET real ( $ET_r$ ) (Doorenbos y Pruitt 1977, Allen *et al.* 1998).

La  $ET_r$  estima el consumo de agua de los cultivos que ocurre en las situaciones reales de campo en condiciones de secano. En cultivos de verano realizados en secano, las medidas de manejo que logran influir en la disponibilidad de agua son escasas (Giménez y García 2011). Estos autores indican que la diferencia entre  $ET_c$  y  $ET_r$  representa las deficiencias hídricas del cultivo.

El consumo de agua de los cultivos, cuando el contenido de AD del suelo se encuentra por encima de un umbral crítico, está determinado por la tasa de transpiración, la cual es cercana a la que establece la demanda atmosférica. Cuando el contenido de AD se encuentra por debajo de dicho umbral la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber agua del suelo (Dardanelli *et al.*, 2003).

### 1.6.3.1. Disponibilidad de agua en el suelo – Agua disponible total

Evett (2007), Pereira *et al.* (2010) definen a la CAAD, como la cantidad de agua que potencialmente puede ser extraída por las plantas. Debido a que contenidos de humedad por encima de CC no pueden ser retenidos en contra de las fuerzas de gravedad y son drenados y a que contenidos de humedad por debajo del PMP no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas, el total de AD en la zona radicular será la diferencia entre los contenidos de humedad a CC y el PMP:

$$ADT = 1000 (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Z_r$$

Donde ADT es el total de AD en la zona radicular del suelo (mm),  $\theta_{CC}$  contenido de humedad a capacidad de campo ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\theta_{PMP}$  contenido de humedad en el punto de marchitez permanente ( $m^3 m^{-3}$ ),  $Z_r$  profundidad de las raíces (m) (Evett 2007, Pereira *et al.* 2010).

### 1.6.3.2. Agua fácilmente disponible

A pesar de que en teoría existe AD hasta alcanzar el PMP, la cantidad de agua extraída por el cultivo se reducirá significativamente antes de alcanzar el PMP. Cuando el suelo contiene suficiente humedad, el mismo es capaz de suministrar el agua con suficiente velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo, por lo que la extracción del agua será igual a la ETc. A medida que disminuye la cantidad de humedad en el suelo, el agua será retenida más fuertemente a la matriz del suelo y será más difícil de extraer (Evett 2007, Pereira *et al.* 2010).

Allen *et al.* (2006) indican que cuando el contenido de humedad del suelo está por debajo de cierto valor umbral, el agua en el suelo no puede ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comienza a sufrir estrés hídrico. La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin



experimental estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo

$$\text{AFA} = p \text{ ADT}$$

Donde:

AFA agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm), “p” fracción promedio del total de AD en el suelo (ADT) que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico (reducción de la ET) (0 – 1) (Allen *et al.*, 2006).

El factor “p” varía de un cultivo a otro, y normalmente los valores se encuentran entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de ETc (> 8 mm d<sup>-1</sup>), hasta 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ETc (< 3 mm d<sup>-1</sup>). El valor de “p” de 0,50 es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos (Allen *et al.* 1998, Pereira *et al.* 2010).

El valor de “p” depende del poder evaporante de la atmósfera. Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ETc es alto, “p” será entre 10 y 25% menor que los valores sugeridos por Allen *et al.* (1998) y el suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la ETc es baja, el valor de “p” será hasta 20% mayor que los valores sugeridos por Allen *et al.* (1998). Se utiliza generalmente un valor constante de “p” para cada periodo específico de desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de “p” de acuerdo a la tasa de ETc es  $p = p + 0,04 (5 - \text{ETc})$  donde el valor ajustado de “p” es limitado a  $0,1 \leq p \leq 0,8$  y el valor de ETc es en mm día<sup>-1</sup> (Pereira *et al.*, 2010).

A su vez el valor de “p” es también función del tipo de suelo. Sugiriendo que para suelos de textura arcillosa los valores de “p” serán 5-10% menores a los sugeridos por Allen *et al.* (1998), mientras que para suelos de textura

arenosa, estos valores pueden incrementarse en un 5-10% (Pereira et al., 2010).

### 1.7. NECESIDADES DE AGUA DEL CULTIVO DE SOJA

Las necesidades de agua de las plantas varían en función de la especie, el suelo y las condiciones climáticas durante la temporada de crecimiento (Scott *et al.*, 1987).

Karam *et al.* (2005) indicaron que las tasas de ET oscilan entre 5-8,4 mm día<sup>-1</sup>. Cuando las plantas son jóvenes la tasa de ET es baja, alcanzan un máximo durante el desarrollo reproductivo, y luego disminuye a medida que las plantas se aproximan a la madurez, resultados similares fueron reportados por (Berlato 1986, Kabalan 1998, citados por Karam *et al.*, 2005).

Andrade *et al.* (2000) indican que el cultivo de soja presenta ETc media diaria de 4 mm día<sup>-1</sup> durante el ciclo del cultivo, también señalan que la ETc presentó un rápido incremento entre V3 y V6 y valores máximos de ETc entre R1 y R6, siendo la máxima del orden de los 7,6 mm día<sup>-1</sup>. Este último valor es coincidente con el 80% o más de intercepción de radiación fotosintéticamente activa (IRFA), la que es lograda en soja cuando se alcanza un IAF de 3,5 (Andrade *et al.*, 2000).

Vivan (2010) reportó resultados similares, la ETc del cultivo de soja presentó un pico durante el llenado de grano (7-8 mm día<sup>-1</sup>), disminuyendo posteriormente. Doss *et al.* (1974) indicaron que los requerimientos de agua de la soja son más altos durante la antesis y el período de llenado de grano.

Para cultivos con buena disponibilidad hídrica, el consumo acumulado representado como ETc depende de la ETo, de la evolución del Kc y de la duración del ciclo (Della Maggiora *et al.*, 2000).

A medida que la soja alarga su ciclo, aumenta la cantidad total de agua consumida. El largo del ciclo de un cultivo de soja variará fundamentalmente

con la FS y con la sensibilidad al fotoperiodo del cultivar (Andriani 2002, Giménez 2007).

Doorembos y Kassam (1979) reportaron que las necesidades de agua para la máxima producción varían entre 450 y 700 mm, dependiendo del clima y de la duración del ciclo, mientras que Scott *et al.* (1987) reportaron consumos de agua en toda la temporada de cultivo de 720 mm.

Andrade *et al.* (2000) determinaron una ETc promedio de 454 mm para soja, en la zona de Balcarce, Argentina, para el período comprendido entre los años 1993-1996.

Giménez 2012, en Uruguay determinó una ETc promedio de 3 años en el cultivo de soja de 483 mm, con máximos de 524 mm y mínimos de 423 mm. La diferencia el autor la atribuye a las importantes PP ocurridas en el año con menor ETc. A su vez Giménez (2012) observó que a partir R1 y hasta R6 el consumo varió de 66 a 69% del consumo total. Entre R1 y R6 ocurren las etapas más importantes del ciclo en la determinación del rendimiento y el consumo de agua es proporcionalmente elevado. El PC presentó consumos de agua que variaron entre 30 y 38% del total.

La ubicación temporal del PC en soja dependió del GM y de la FS, en GM V, y VI y en FS de noviembre, el PC se ubicó principalmente durante el mes de febrero. Las etapas de mayor consumo de agua (R1-R3), en esas condiciones, ocurrieron principalmente en enero que es el mes de máximas demandas atmosféricas (Giménez, 2012).

Giménez y García (2011), analizando una serie histórica de 23 años entre 1984 y 2007, para dos cultivares de soja y dos zonas climáticas contrastantes de Uruguay; estimaron para el GM VI una ETc promedio de 627 mm en Colonia (región sur) y 641 mm para Salto (región norte), mientras que el GM IV presentó una ETc promedio 567 y 504 mm para Colonia y Salto, respectivamente. Estos autores indicaron que para los dos GM las ETc diarias son superiores en Salto, debido a los valores de radiación solar y

temperaturas mayores que en Colonia. Sin embargo la ETc total para el GM IV, fue superior en la localidad de Colonia. Esto se debió a que los GMs cortos, presentaron baja sensibilidad al fotoperiodo, la acumulación de temperaturas es el factor de mayor importancia en la inducción floral y por ende en la duración del ciclo (Hadley *et al.* 1984, Giménez y García 2011).

La ETc presentó variabilidad entre años, la mayor variación se registró en los años “Niña” y “Niño” con mayores y menores valores, respectivamente. Los años “Neutros” mostraron un comportamiento intermedio y de menor variabilidad (Giménez y García, 2011).

Las ETr fueron sensiblemente menores que las ETc y con mayor variabilidad entre años, debido al comportamiento variable de las PP, las que determinaron la disponibilidad hídrica para los cultivos. En años extremos las ETr se comportaron es forma inversa a las ETc con mayores valores en años “Niño” y menores en años “Niña” (Giménez y García, 2011).

#### 1.7.1. Eficiencia del uso del agua de soja

La eficiencia del uso del agua (EUA) relaciona la producción de MS o el 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 (2000), 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. Los valores mínimos y máximos en soja son 5 - 11 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> según Micucci *et al.*, (2004).

Della Maggiora *et al.*, (2000) indicaron que la EUA estimada para la soja fue de 9,1 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, este valor es explicado por la baja eficiencia fotosintética y por la concentración energética del grano de soja.

## 1.8. RIEGO

El sector que tiene mayor consumo de agua a nivel mundial es la agricultura (Chipana y Osorio, 2007). La EUA puede ser mejorada a través de la adopción de un manejo eficiente del riego y de técnicas adecuadas para la mejor conservación de los recursos hídricos. El gran desafío de la primera mitad del siglo XXI es continuar aumentando la producción de alimentos con cantidades de agua cada vez menores. Un adecuado manejo del riego es aquel que determina cuándo y cuánto regar, basado en la necesidad de agua de las plantas, en las características de suelo y las condiciones meteorológicas del ambiente del cultivo, de manera de optimizar la calidad y cantidad de producto obtenido.

Como vimos anteriormente el rendimiento del cultivo de soja en nuestro país es altamente dependiente del régimen de PP. Durante el verano, y en condiciones promedio, el contenido de agua disponible de los suelos no satisface la demanda del cultivo. La CAAD de nuestros suelos oscila entre 60-180 mm de AD, lo cual representa en el mejor de los casos, un tercio de las necesidades de agua del cultivo, marcando así la importancia del tema del riego (Agorio *et al.* 1988, Giménez 2010, Giménez 2012).

En el país la superficie potencial de riego es de 1.760.000 ha, aplicándose efectivamente al regadío 210.000 ha, o sea que en el año 2000 sólo se utilizaba una novena parte del potencial de área posible de regar (Aquastat-FAO 2000, citado por Dardanelli *et al.*, 2010). Desde el año 2000 a la fecha la evolución del área de riego ha presentado un leve aumento, pero la característica más relevante de este período es el aumento del área de riego de cultivos tradicionalmente de secano, con una disminución del área de riego de arroz (Failde *et al.*, 2013).

La investigación nacional en riego suplementario de cultivos y pasturas, ha sido en general escasa y no ha presentado la continuidad y profundidad necesarias. Sin perjuicio de ello, en cultivos de verano se han logrado

resultados físicos favorables, básicamente en maíz (Hofstadter y Gonnet 1980, Roselli y Texeira 1998, Romero 2000, Baccino y Formoso 2002, Giménez 2004) y con menor información en sorgo granífero (Fassio *et al.*, 1992), soja (Giménez 2010, Giménez 2012 y Giménez *et al.* 2014) y girasol (Sawchik y Formoso, 2000).

Como resultado, existe una continua necesidad de desarrollar y/o mejorar las herramientas disponibles para el manejo óptimo del agua en la agricultura, que permita expresar el potencial de rendimiento de los cultivos para los diferentes ambientes de producción.

#### 1.8.1. Respuesta al riego suplementario

En regiones húmedas, en donde las PP son muy variables durante el verano, el riego suplementario durante los periodos secos permite aumentar y estabilizar los rendimientos, en la medida que se utilice adecuadamente (Agorio *et al.* 1988, Sawchik y Ceretta 2005, Giménez y García 2009, Giménez 2012).

La literatura registra un amplio rango de rendimientos máximos de soja a nivel mundial que oscila entre 4500 y 8600 kg ha<sup>-1</sup> aproximadamente (Flannery 1983, Cooper 2003, Lawn *et al.* 1984, Seityono *et al.* 2007, citados por Giménez *et al.*, 2014). La evaluación nacional de cultivares realizada en seco, en los materiales evaluados entre 2009 y 2013 registró rendimientos máximos que variaron entre 3103 y 5948 kg ha<sup>-1</sup> (INASE-INIA 2010, INASE-INIA 2011, INASE-INIA 2012, INASE-INIA 2013, INASE-INIA 2014).

La soja es un cultivo altamente sensible a las deficiencias hídricas y ésta es la principal limitante para expresar los rendimientos potenciales que posee el cultivo (Farias *et al.* 2006, Giménez 2012). Por lo que el riego suplementario es una tecnología que permite aumentar y estabilizar la producción (Salinas 2010, Giménez 2010, Giménez 2012).

Giménez (2012) indicó que para el país los rendimientos potenciales de soja bajo riego variaron entre 4885 kg ha<sup>-1</sup> y 7275 kg ha<sup>-1</sup> para diferentes años. Indicando que el año de bajo potencial de rendimiento, fue con excesos de PP y baja radiación solar incidente.

Salinas (2010) aportó que la aplicación de riego suplementario en soja produjo aumentos y estabilidad de los rendimientos en Manfredi-Argentina, obteniendo un rendimiento promedio en una serie de 15 años de 4018 kg ha<sup>-1</sup> bajo riego y 3074 kg ha<sup>-1</sup> en secano para siembras de primera.

Las variaciones en los rendimientos máximos de soja son consecuencia de la diferente disponibilidad de radiación, agua y nutrientes y la disponibilidad hídrica es el factor más limitante, por lo que el manejo del agua es el aspecto principal sobre el cual trabajar para disminuir las brechas en producción de soja (Salvagiotti, 2009).

#### 1.8.2. Riego deficitario

El riego deficitario 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 el riego deficitario tiene éxito en el aumento de la productividad del agua para diversos cultivos sin causar severas reducciones de rendimiento (Rosadi *et al.*, 2005).

El riego limitado o deficitario puede aumentar el rendimiento del cultivo, evitando la falta de humedad en momentos críticos (Sweeney *et al.*, 2003). Es una estrategia de riego que toma en cuenta las deficiencias hídricas para el cultivo y puede reducir la demanda hídrica del cultivo, haciendo así más eficiente el uso de los recursos hídricos (Krida *et al.* 1999, citados por Rosadi *et al.*, 2005).

Los 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 1978, Elmore *et al.* 1988, Spetch *et al.* 1989, citados por García y García *et al.*, 2010). Esto podría dar lugar a una mejora de la EUA de riego, debido principalmente a la eliminación de riegos durante las etapas vegetativas, cuando la evaporación del suelo es la causa principal de la pérdida de agua (Neyshabouri y Hatfield, 1986).

Giménez (2010), Giménez (2012), Giménez *et al.* (2014), indicaron que las deficiencias hídricas durante el PC provocan mayores pérdidas de rendimiento en soja en comparación con deficiencias durante el PNC, pudiendo aplicarse criterios de riego deficitarios en etapas vegetativas sin grandes mermas en el rendimiento.

Carballo de Silva (1990) indicó que en soja se debe tener un buen control sobre el riego, debido a que al inicio de la etapa reproductiva, los excesos hídricos provocan un incremento de la altura de planta y pueden producir vuelco, 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.

Allen *et al.* (1998) proponen que se puede calcular la (ET<sub>taj</sub>) cuando el cultivo está bajo estrés hídrico (contenido de agua del suelo por debajo del qc).

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

$K_s$  es el coeficiente de estrés del cultivo y es de suma importancia para la planificación del riego deficitario, ya que permite conocer la ET<sub>taj</sub> (Rosadi *et al.*, 2005).

Doorenbos y Kassam (1979) 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:



$1 - Y_a/Y_c = K_y (1 - ET_a/ET_c)$ , 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 (Doorenbos y Kassam, 1979).

### 1.8.3. Manejo del riego suplementario

El riego suplementario es una práctica tecnológica que permite aumentar y estabilizar los rendimientos en soja, en la medida que se utilice adecuadamente. Dada la escasa literatura sobre este tema en el país y la creciente importancia del riego suplementario en cultivos resulta imprescindible poner a punto herramientas que permitan optimizar los rendimientos y el uso del agua (Agorio *et al.* 1988, Sawchik y Ceretta 2005, Giménez y García 2009, Giménez 2012).

El riego suplementario puede ser una estrategia viable para potenciar áreas de producción siempre que se levanten limitantes tecnológicas del manejo de los cultivos y se utilicen herramientas adecuadas para la programación del riego. Esto implica contestar correctamente a las preguntas sobre cuánto (cantidad de agua a aplicar) y cuándo (momento oportuno) regar (Sawchik, 2012).

Para contestar estas preguntas se debe tener en consideración el sistema suelo-planta-atmósfera, debido a que la decisión de cuándo y cuánto regar va a estar determinada por las características del suelo como la CAAD, las características del cultivo (estado de desarrollo del cultivo, distribución del sistema radicular, IAF, altura de planta, etc.) y por la ETo.

La frecuencia y la cantidad de agua a aplicar dependerán principalmente de la CAAD y de la ETc (Carlesso 2010, García 2012). A los efectos del riego se considera no la totalidad del perfil del suelo, sino que éste queda limitado a la profundidad radicular (García, 2012).

García (2012) indicó que un riego correcto consiste en dejar secar el suelo hasta llegar al umbral de riego (UR), en ese momento aplicar una cantidad de agua igual al AFD y llevarlo nuevamente a CC. Cuando se riega, esa cantidad igual al AFD se conoce como Lámina Neta (LN). Por tanto cuando el cultivo evapotranspire esa lámina se debe volver a regar. La velocidad con que el suelo se va secando hasta llegar al UR va a depender de la ETc.

La determinación de la ETc a lo largo del ciclo del cultivo, es fundamental para estimar las necesidades de hídricas del mismo, como la ETc está determinada por la ETo, es necesario conocer las condiciones específicas del lugar donde se desarrolla el cultivo (Carlesso, 2010).

Para regar adecuadamente se debe tener bien cuantificado el consumo de agua de los cultivos, debido a que riegos leves o inferiores a los requerimientos reponen el agua solamente en la superficie del suelo y no en toda la zona radicular. Por este motivo, las raíces se concentran en la superficie y no exploran la totalidad del suelo disponible, mientras que en riegos excesivos pueden causar daños en el cultivo, además de causar pérdidas de agua y nutrientes por percolación profunda (Carlesso, 2010).

### 1.9. METODO DE BALANCE HÍDRICO DEL SUELO

La programación y el cálculo de las necesidades de riego en base a parámetros del suelo, como el contenido de humedad, presenta limitaciones, en tanto no se toman en cuenta otros parámetros del sistema suelo-planta-clima y requiere un monitoreo continuo en el tiempo. Por esta razón como alternativa complementaria, y para el cálculo de necesidades de riego se utiliza un modelo de balance hídrico (BH) de suelos, es un método preciso para calcular las necesidades de riego de un cultivo; integra aspectos de suelo-cultivo-clima (Pereira *et al.* 1995, Allen *et al.* 1998, Pereira *et al.* 2010, Sawchik 2012).

El concepto de BH a nivel de campo implica considerar las entradas y salidas de agua en un determinado volumen de suelo durante un periodo de

tiempo (Hillel, 1998). De manera simplificada el BH se puede representar como:

Cambio en el almacenaje de agua en el suelo = Ganancias – Pérdidas

o de manera más detallada:

$$\Delta S = (P + I + U) - (R + D + E + T)$$

Dónde:  $\Delta S$ , representa el cambio en el almacenaje de agua de suelo en la zona radicular; P, es la precipitación; I, representa la lámina de riego; U, representa el aporte positivo por ascenso capilar. Mientras que R, representa el escurrimiento; D, el drenaje profundo fuera de la zona radicular; E, la evaporación desde la superficie del suelo y T, la transpiración por las plantas (Pereira *et al.*, 2010).

En términos prácticos la magnitud del componente U puede considerarse como insignificante (Pereira *et al.*, 2010). Entonces en condiciones de riego puede reformularse el BH de suelos como:

$$(\Delta S) = (P-R) + I - ETr$$

En donde  $ETr = T + E$  y representa la ET del cultivo.

Entonces se puede a partir de la ecuación de BH determinar el requerimiento neto de riego,

$$I_{rn} = \Sigma (ET - P_{ef.}) - W_b$$

Donde  $I_{rn}$ , es el requerimiento neto de riego para un periodo de tiempo dado; ET, puede ser expresada como  $ET_c$ ;  $P_{ef.}$ , es la precipitación efectiva, a los efectos prácticos la diferencia entre la PP y el escurrimiento y  $W_b$ , es el agua almacenada al principio del periodo para satisfacer los requerimientos de ET (Pereira *et al.* 2010, Sawchik 2012).

## 1.10. MODELOS DE SIMULACIÓN

Una gran cantidad de herramientas están disponibles para realizar la más adecuada planificación del riego en un determinado sistema de producción, buscando la mejor eficacia y eficiencia en el uso del agua, con el mínimo impacto negativo en el medio ambiente (Otero y Goñi, 2009). Estas herramientas van desde el uso de sensores ambientales (agro-meteorológicos), sensores de disponibilidad y calidad del agua en el suelo y subsuelo, sensores del estado hídrico de la planta, hasta modelos de simulación más o menos complejos del consumo de agua a nivel de planta o modelos de simulación del BH de los suelos. Estas herramientas además pueden ser usadas tanto a nivel regional (ej. INIA-GRAS), a nivel de cuencas hidrográficas (SWAT, WEPP, etc.) o a nivel de predios de producción Winlsareg (Otero y Goñi, 2009).

Las primeras referencias de modelos de simulación de crecimiento de cultivos datan de la década del 70 del siglo anterior (de Wit *et al.* 1970, Arkin *et al.* 1976, citados por Stöckle *et al.*, 2003). En la década del 80 aparecieron las primeras versiones de modelos orientados al apoyo en la toma de decisiones de manejo de cultivos como el riego suplementario y los controles de plagas, malezas y enfermedades; y hacia fines de la década se reportaron antecedentes de uso y aplicaciones de los modelos generados en sistemas comerciales (Stöckle *et al.*, 2003).

Los modelos de simulación de programación del riego son esencialmente de dos tipos: agua flujos modelos de simulación, cuando el balance de agua se calcula a partir de los flujos de agua que entran y salen de la zona de las raíces, y los modelos de simulación de BH del suelo cuando los cálculos se realizan mediante la estimación de la entrada y salida de agua al suelo con un paso de tiempo predeterminado (Pereira *et al.*, 1995).

### 1.10.1. Modelo de balance hídrico de suelo WInlsareg

El modelo de simulación WInlsareg (Teixeira y Pereira, 1992) es una herramienta útil y sencilla que permite estimar el BH de suelos, calcular las necesidades de agua de cultivos bajo diferentes tratamientos de riego o en seco, así como también programar la gestión del riego para máximos rendimientos o para condiciones de aplicación de agua limitada (Liu *et al.* 1998, Pereira *et al.* 2003, Popova *et al.* 2006, Chaterlán *et al.* 2010, Popova y Pereira 2011).

El modelo WInlsareg fue desarrollado para evaluar diferentes estrategias de riego, permite evaluar a través del BH del suelo a nivel predial, diferentes alternativas o programas de riego para distintos cultivos y en distintos escenarios de producción.

En el BH se sigue lo sugerido por Doorenbos y Pruitt (1977) y descrito por Teixeira y Pereira (1992) y Liu *et al.* (1998). La versión del modelo utilizada por Pereira *et al.* (2003) adopta la metodología para computar la ETc y las necesidades de riego propuestas por Allen *et al.* (1998).

Los datos de entrada incluyen las PP, la ETo, la CAAD, el contenido de agua del suelo en la siembra, la contribución potencial de las aguas subterráneas, los Kc (inicial, medio, final) y las fracciones de agotamiento del agua del suelo ("p") para las etapas de crecimiento de los cultivos, las profundidades de la raíz y el factor de respuesta a la producción de agua (Paredes y Pereira, 2010).

Los datos necesarios para realizar el BH del suelo se almacenan en varios archivos:

Datos meteorológicos: la precipitación P (mm), y la ETo (mm). Los cálculos de la ETo utilizando el método de la FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) se llevan a cabo con un programa complementario, EVAPOT.

Datos sobre cultivos: fechas de las etapas de desarrollo y los Kc correspondientes a cada etapa (inicial, media y final); profundidad radicular Zr (m); y la fracción de AD en el suelo que permite la evapotranspiración sin restricciones, o sea el factor “p” (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Datos sobre el suelo: se hace referencia a un suelo de varias capas u horizontes. Para cada horizonte se debe ingresar profundidad respectiva, d (m), y el contenido de agua en el suelo a CC, PMP y la CAAD.

El cálculo de las necesidades de agua de riego se calcula mediante el BH del suelo para la profundidad radicular efectiva como:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - RO_i) + I_i - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000z_{ri}}$$

donde  $\theta_i$  y  $\theta_{i-1}$  son el contenido de agua del suelo en la zona radicular ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), en los días  $i$  y  $i-1$ ,  $P_i$  es la precipitación (mm),  $RO_i$  es la escorrentía (mm),  $I_i$  es el lámina neta de riego (mm) que se infiltra en el suelo,  $ET_{ci}$  (mm) es la  $ET_c$  (mm), el  $DP_i$  representa percolación profunda (mm),  $GW_i$  es la contribución del agua subterránea ascenso capilar (mm), y  $Z_{ri}$  es la profundidad de las raíces (m) en el día  $i$ .  $GW$  y  $DP$  se estimaron a partir de las propiedades hidráulicas del suelo y la profundidad del nivel freático según lo descrito por Liu *et al.* (2006).

El modelo realiza las simulaciones de programación del riego en función de las siguientes opciones:

- definir una programación de riego para maximizar los rendimientos de los cultivos, es decir, sin estrés hídrico.
- generar una programación de riego utilizando UR seleccionados, incluso para el estrés hídrico permitido y responder a las restricciones de agua impuestas en períodos de tiempo determinados.

- evaluar el rendimiento y el uso del agua y los impactos de un programa de riego determinado.
- poner a prueba el rendimiento del modelo con los datos de humedad del suelo observados y usar fechas de riego reales y láminas de riego reales que es la opción utilizada para la calibración y validación del modelo.
- ejecutar el balance hídrico de suelos sin riego.
- Calcular las necesidades netas de riego de cultivos, y la realización de análisis de las necesidades de riego y las frecuencias cuando se considera una serie de datos meteorológicos.

Para poder utilizar los modelos de simulación en forma masiva deben ser calibrados y validados previamente para las condiciones de suelo-planta-clima donde serán utilizados (Liu *et al.* 1998, Pereira *et al.* 2003, Popova *et al.* 2006, Chaterlán *et al.* 2010).

#### 1.10.2. Calibración y validación del modelo

La mayoría de los modelos matemáticos empleados para el cálculo de variables o la simulación de procesos en la zona no saturada del suelo, deben ser previamente evaluados mediante algún tipo de técnica que permita estudiar su capacidad de predicción. El grado de predicción del modelo es juzgado mediante la comparación entre los valores calculados y los datos observados o medidos (Ritter *et al.*, 2010).

El modelo Winsareg ha sido utilizado en varias regiones del mundo y en varios cultivos partiendo desde la calibración adecuada hasta la validación a través de comparar el volumen de agua simulado por el modelo con el observado en el suelo (Liu *et al.* 1998, Popova *et al.* 2006, Chaterlán *et al.* 2010, Popova y Pereira 2011). Sin embargo en la literatura revisada no se registran antecedentes en relación a la calibración del modelo de simulación Winsareg para soja. Esto puede ser consecuencia de que la soja en general se cultiva mayoritariamente en condiciones de secano; por ejemplo en

Estados Unidos (principal productor de soja a nivel mundial), solamente se riega el 8% del área total (Steduto *et al.*, 2012). En la última década por la expansión de la soja en la región comenzó a tener importancia el riego en el cultivo.

La calibración es un ajuste de ciertos parámetros del modelo para obtener una correlación alta entre los valores experimentales y los simulados (Hussein *et al.*, 2011).

La metodología para calibrar el modelo WinSareg fue desarrollada por Liu *et al.* (1998) y luego adoptada por Popova *et al.* (2006), Chaterlán *et al.* (2010). La misma consistió en ajustar el  $K_c$  y la fracción de agotamiento de agua disponible sin estrés “ $p$ ”, para las tres fases fundamentales de desarrollo del cultivo. De forma tal que las diferencias entre los valores del contenido de agua en el suelo observados a campo y los valores de agua en el suelo simulados por el modelo sean mínimas (Popova y Pereira 2011).

Luego de calibrado el modelo se debe validar utilizando datos de cultivos y meteorológicos diferentes a los utilizados en la calibración con los valores de  $K_c$  y “ $p$ ” obtenidos. En esta etapa se busca la confirmación de que el modelo logró un buen desempeño en una situación diferente a la utilizada para la calibración (Liu *et al.* 1998, Popova *et al.* 2006, Chaterlán *et al.* 2010, Popova y Pereira 2011). En la validación se busca comparar si la salida del modelo (simulación) es correcta o no respecto a la realidad (Hussein *et al.*, 2011).

### 1.10.3. Ajuste estadístico de modelos de simulación

Para evaluar la capacidad de predicción de un modelo, existen numerosos procedimientos propuestos por diversos autores. En varias publicaciones (Willmott 1981, Loague y Green 1991, Legates y McCabe 1999, Santhi *et al.* 2001, Van Liew *et al.* 2003, Krause *et al.* 2005, Moriasi *et al.* 2007, Jain y Sudheer 2008) se describen diversos índices o indicadores de bondad de ajuste conocidos, así como discusiones rigurosas sobre la idoneidad,



ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Sin embargo, no existe un acuerdo general sobre el procedimiento estándar para la evaluación de la capacidad de predicción de los modelos (Ritter *et al.*, 2010).

Willmott (1981), Loague y Green (1991), Legates y McCabe (1999), Santhi *et al.* (2001), Van Liew *et al.* (2003), Krause *et al.* (2005), Moriasi *et al.* (2007), Jain y Sudheer (2008), Ritter *et al.* (2010), indican que para evaluar el grado de predicción de los modelos de simulación se deben comparar los valores calculados o simulados con los correspondientes datos observados o medidos.

En la literatura, Rivas y Carmona (2010), Ritter *et al.* (2010) se destacan tres aspectos en los que parece haber acuerdo: i) la necesidad de un procedimiento estándar para la evaluación de modelos matemáticos; ii) el inadecuado procedimiento que es cuantificar la bondad de ajuste, sólo con indicadores de correlación, como es el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y iii) Legates y McCabe (1999) proponen que la evaluación de la capacidad predictiva de los modelos debe incluir por lo menos un indicador del error, un índice adimensional (o indicador del error relativo) cuantificador de la bondad de ajuste y un procedimiento gráfico que ilustre la comparación entre los valores calculados y los observados.

A su vez la interpretación del valor de los diversos indicadores de bondad de ajuste es también controvertida. En primer lugar, porque la información que representa cada índice tiene distinto significado. En segundo lugar, porque no existen criterios estándar sobre los intervalos de valores que indican cuando la capacidad predictiva es aceptable, buena, muy buena, etc. (Ritter *et al.*, 2010).

Kirchner *et al.* (1996) indicaron que en la práctica habitual en la evaluación de modelos, la conclusión sobre el grado en el que los valores calculados se aproximan a los datos observados se caracteriza por una falta de objetividad.

Rivas y Carmona (2010) indicaron que el modelo perfecto es cuando el coeficiente de regresión ( $b$ ) = coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = índice de Willmott ("d") = eficiencia (EF) = 1 y raíz cuadrada media del error (RCME) = error absoluto medio (AAE) = 0. Sin embargo otros autores sugieren algunos valores que deberían considerarse en la validación de un modelo. Cai *et al.* (2007), Rivas y Carmona (2010), Stockle *et al.* (2004) aportan que un modelo tiene un buen ajuste cuando:  $R^2 \geq 0,80$ ;  $b$  está cerca de 1 ( $1 \pm 0,1$ ) y el índice de Willmott "d"  $\geq 0,95$ .

Paredes *et al.*, (2014) por su parte para calibrar y validar el modelo AcuaCrop utilizó valores sugeridos por Ma *et al.*, (2011) de: RCME  $\leq 15\%$ ; AAE  $\leq 10\%$ ;  $R^2 \geq 0,80$ ; EF  $\geq 0,70$ .

No es posible probar de manera absoluta que un modelo es válido o no, en realidad se habla de la confianza que se puede tener en el modelo (Ritter *et al.*, 2010).

A su vez Ritter *et al.* (2010) indican que para evaluar si un modelo es confiable, lo que se hace es probar si el modelo es incorrecto, cuantas más pruebas estadísticas o índices de ajustes se realizan sin poder probar que el modelo es incorrecto más confianza se tendrá del mismo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la calibración y validación del modelo Winsareg, para el cultivo de soja en las condiciones de Uruguay, se utilizaron los datos de los experimentos de Manejo de agua y riego de soja realizados durante las zafas 2011-12 y 2013-14 en la Estación Experimental “Dr. M. A. Cassinoni” (EEMAC). En el marco de los proyectos FPTA 261 y FMV 6405 de la ANII.

### 2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO

El ensayo se realizó en el campo experimental de riego de la EEMAC, ubicado sobre la ruta 3, km. 363, Paysandú, Uruguay (32°22' S 58°03'W). El suelo se caracterizó como un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, Pachic Argiudoll), perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel en la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (escala 1:1000.000), (Altamirano *et al.*, 1976).

Previo a la instalación de los ensayos se procedió a la caracterización hídrica del suelo, la misma a través de la curva de retención de agua del suelo realizada en el laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía, donde se determinó la CC y el PMP para cada horizonte. Las características hídricas del suelo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características hídricas del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	CC (%Vol.)	PMP (% Vol.)	CAAD (mm)
A	0-0,20	27	14	26
B	0,20-0,60	45	30	60
C	0,60-0,75	32	22	15
Total	0,75			101

CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; CAAD: Capacidad de almacenamiento de agua disponible, expresados como % en volumen de suelo.

### 2.1.1. 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  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de súper fosfato de calcio (0-46-0) que fue incorporado con rastra excéntrica.

Los ensayos se sembraron el 11 y 21 de noviembre de 2011 y 2013, respectivamente, 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 HC indeterminado. En estado V2 se realizó un ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr una población de  $300.000 \text{ plantas ha}^{-1}$ .

Los cultivos de soja se mantuvieron libres de plagas, malezas y enfermedades y fueron fertilizados como para que no presentaran restricciones nutricionales de manera de que el crecimiento, desarrollo y rendimiento sólo se modificara en respuesta a los cambios en la disponibilidad hídrica.

### 2.1.2. Tratamientos

- Los tratamientos (T) evaluados en los ensayos realizados fueron los siguientes:
- T1 = Sin deficiencias hídricas en el todo el ciclo, con el contenido de agua en el suelo igual o superior a 60% AD durante el PC e igual o superior a 40% de AD en las etapas no críticas (ENC).
- T2 = Deficiencias hídricas en ENC. Desde VE a R4 el contenido de agua en suelo fue menor a 40% y mayor a 20% AD y en PC mayor a 60% AD.
- T3 = Deficiencias hídricas en etapas vegetativas y PC. Contenido de agua en suelo fue menor a 40% y mayor 20 % AD desde VE a R4 y en PC fue menor a 60% AD y mayor de 20% AD.

- T4= Riego deficitario continuo, en este tratamiento riego durante todo el ciclo con la mitad del volumen aplicado en el T1.
- T5= Secano. Sin ningún tipo de control sobre el contenido hídrico del suelo (riego o simuladores de sequia).

Para la aplicación de la metodología experimental consideramos el PC de determinación del rendimiento a las etapas comprendidas entre los estadios R4 y R6.

El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones. Las unidades experimentales fueron 15 y estuvieron constituidas por 5 hileras del cultivo de 5 m de longitud, sembradas con una distancia entre hileras de 0,4 m.

Para determinar los umbrales hídricos de suelo definidos, se realizaron dos tipos de intervenciones: riego suplementario mediante riego por goteo y la contención de las PP en los tratamientos con déficit hídrico, a través de la utilización de simuladores de sequía parcelarios y móviles (rain shelters). Los mismos fueron construidos en estructuras de hierro con cubiertas de lonas impermeables, las estructuras de hierro fueron diseñadas con techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Las dimensiones de los simuladores se adecuaron al tamaño de las parcelas siendo estos de 2 m x 5 m x 1,5 m. Estos fueron colocados sobre las parcelas de cultivo en las que se definieron etapas con deficiencias hídricas, antes de cada evento de PP y retirados inmediatamente después de los mismos, de modo de no provocar transformaciones significativas en las condiciones de radiación solar y temperaturas. 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, de modo de impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento. Y también fueron construidos desagües para evacuar el exceso de agua proveniente del escurrimiento superficial y de los techos de los simuladores.

Se utilizó un sistema de riego por goteo, lo que permitió agregar agua con gran precisión en el volumen y en las etapas de desarrollo definidas. En cada hilera de cultivo se dispuso una cinta de goteros con un caudal de 1,47 lt h<sup>-1</sup>, espaciados cada 0,20 m.

Para determinar la lámina de riego a aplicar se realizó un BH de suelos de paso diario, de acuerdo a la siguiente fórmula:  $\Delta H_2O = R + PP - ET_c$ , siendo  $\Delta H_2O$  la variación del agua en el suelo (mm), 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  $ET_o$  fue la ET del cultivo de referencia y  $K_c$  el coeficiente del cultivo. La  $ET_o$  fue calculada a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith y se utilizaron los  $K_c$  recomendados por FAO (Allen *et al.*, 1998).

Tabla 2: Precipitaciones (mm) y riego (mm) para el año 2011-12 tratamiento 1 (T1) de bienestar hídrico y para el año 2013-14 tratamientos 1 (T1) de bienestar hídrico, tratamiento 4 (T4) de riego deficitario controlado y tratamiento 5 (T5) en secano.

PP	2011/2012		2013/2014	
	T1	T1	T4	T5
Inicial	0	53	53	53
Desarrollo	58	74	74	74
Medio	305	573	573	573
Final	269	75	75	75
Riego	T1	T1	T4	T5
Inicial	0	0	0	0
Desarrollo	108	162	65	0
Medio	288	26	13	0
Final	0	0	0	0

Ver anexo 2.

## 2.2. DETERMINACIONES REALIZADAS

### 2.2.1. Suelo

El contenido de agua en el suelo fue monitoreado mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE. Las mediciones de agua se realizaron cada 0,1 m, en tubos de acceso de aluminio de un m de

longitud y dos pulgadas de diámetro. La fecha en que se realizaron los muestreos fueron: 5/12, 9/12, 15/12, 20/12, 26/12, 2/1, 11/1, 19/1, 10/2, 16/2, 22/2 y 5/3 para el año agrícola 2011-12 y 12/12, 26/12, 3/1, 9/1, 18/1, 25/1, 2/2 y 8/2 para el año agrícola 2013-14.

Previamente a la utilización del equipo se construyó una curva de calibración para el suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad del suelo a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas a las mismas profundidades con la sonda de neutrones, obteniendo una curva de calibración del equipo ajustada con  $R^2 = 0,95$  (Giménez, 2011).

### 2.2.2. Cultivo

Durante el desarrollo del cultivo el mismo fue monitoreado, determinando la fecha de ocurrencia de cada una de las etapas fenológicas del mismo.

Asimismo se determinó la altura de planta para cada etapa, la producción de MS y el rendimiento total en grano.

Para los objetivos de este trabajo solo se utilizaron los datos referentes al BH del suelo, la fenología del cultivo, la profundidad radicular y la altura de planta.

### 2.2.3. Condiciones Climáticas

La información climática fue provista a partir de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2tm, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, ca), ubicada aproximadamente a 2000 m del campo experimental en la EEMAC, excepto las PP que fueron medidas en un pluviómetro ubicado en el sitio experimental.

Los datos climáticos utilizados para realizar simulaciones con el modelo fueron ETo ( $\text{mm d}^{-1}$ ), Precipitación ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

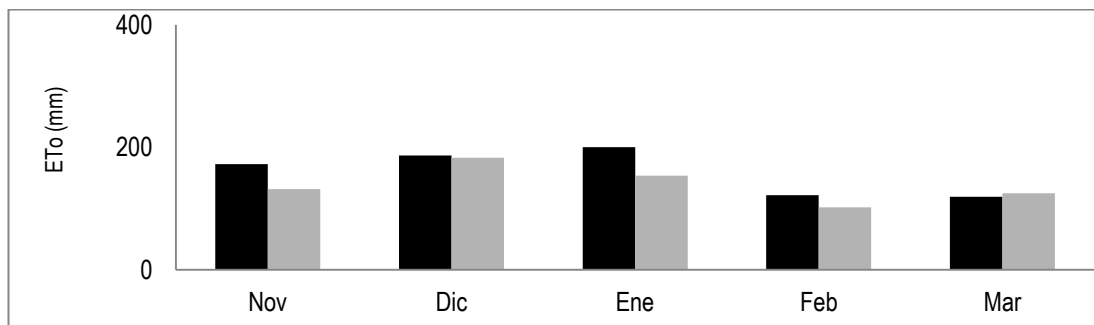


Figura 1. Evapotranspiración de referencia (ETo) mensual de la EEMAC para los años 2011-12 (columnas negras) y 2013-14 (columnas grises).

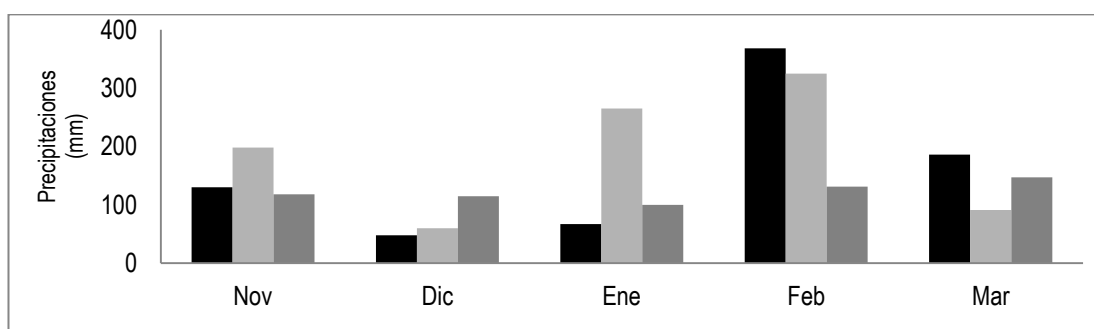


Figura 2. Precipitaciones promedio mensuales en Paysandú para la serie histórica 1961 a 2009 (columnas gris oscuro), y valores registrados en campo experimental de riego para el año 2011-12 (columnas negras) y para el año 2013-14 (columnas gris claro).

### 2.3. MODELO Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

La versión de WinISAREG utilizada fue la 1.4.0., de libre acceso, disponible en la siguiente página web:

<http://ceer.isa.utl.pt/cms/index.php?option=downloads&catid=33&Itemid=50&-Modelos>.

#### 2.3.1. Metodología utilizada para la calibración y validación del modelo

Para la calibración y validación del modelo Winsareg para el cultivo de soja en las condiciones del país se utilizaron los datos de los experimentos de Manejo de agua y riego de soja descritos anteriormente, los mismos se realizaron independientemente del modelo a calibrar y validar a nivel local.



Esta independencia proporciona condiciones adecuadas para poner a prueba el modelo (Liu *et al.*, 1998).

El proceso de calibración y validación se realizó siguiendo la metodología descrita por Liu *et al.* (1998), la cual fue adoptada también por Popova *et al.* (2006), Cholpankulov *et al.* (2008), Chaterlán *et al.* (2010), Popova y Pereira (2011).

La calibración del modelo consistió en determinar los valores “Kc” y “p” para cada etapa de desarrollo del cultivo (inicial, media y final), que conducen a un mayor ajuste de los valores del contenido de agua del suelo observado y el simulado por el modelo.

En la calibración se utilizó la base de datos de los experimentos de la temporada 2011-12, utilizando para ello el tratamiento T1 de bienestar hídrico. El modelo fue cargado con los parámetros de clima (ETo y PP), suelos (CC, PMP para cada horizonte y profundidad de cada horizonte), cultivos (calendario de eventos fenológicos y profundidad radicular) y riego (fecha de riego y volumen de aplicación), requeridos.

Una vez ajustados los Kc y los “p” en el proceso de calibración se procedió a validar el modelo.

En la etapa de validación se buscó confirmar el desempeño del modelo en situaciones diferentes a la que se usó para la calibración. Para el proceso de validación del modelo se utilizó la base de datos del año 2013-14 para los tratamientos T1, T4 y T5, usando los valores de Kc y “p” ajustados en la calibración.

Los datos experimentales no fueron utilizados para analizar los tratamientos, sólo se utilizaron para evaluar la capacidad del modelo para predecir la humedad del suelo.

## 2.4. BONDAD DE AJUSTE O AJUSTE ESTADÍSTICO DEL MODELO

De acuerdo a lo indicado por Ritter *et al.* (2010) y a los indicadores estadísticos utilizados por diferentes autores (Liu *et al.* 1998, Popova *et al.* 2006, Cholpankulov *et al.* 2008, Chaterlán *et al.* 2010, Popova y Pereira 2011) para evaluar el ajuste del modelo Winsareg, utilizaremos:

Coefficiente de regresión forzado del original (b),

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2}$$

Coefficiente de determinación ( $R^2$ ),

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0,5} (\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)^{0,5}} \right]^2$$

Error absoluto medio (AAE),

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i$$

Raíz cuadrada media del error (RCME),

$$RCME = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5}$$

Relación de la Raíz cuadrada media del error (Rel RCME),

$$Rel RCME = \left[ \frac{RCME}{\bar{O}} \right] 100$$

Índice de Willmott "d",

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Eficiencia (EF),

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Dónde:  $P_i$  = Valores simulados;  $O_i$  = Valores observados;  $n$ : Número de medidas, pares de datos observados - simulados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO WINISAREG

En la Tabla 3 se presentan los Kc y “p” que mostraron el mejor ajuste para cada etapa de desarrollo del cultivo y la fecha de ocurrencia de cada etapa.

Tabla 3. Coeficientes de cultivo (Kc) y fracción de agotamiento de agua disponible en el suelo sin estrés (“p”) ajustados en la calibración y etapas de desarrollo del cultivo en el año agrícola 2011-12.

	Etapas de crecimiento del cultivo			
	Inicial	Desarrollo	Medio	Final
Kc	0,35	0,35-1,18	1,18	0,75
"p"	0,4-0,6	0,6	0,4	0,6
Ubicación temporal de la etapa	11 Nov–26 Nov	27Nov–29 Dic	30 Dic–15 Feb	16 Feb–30 Mar
Etapas fenológicas	Vs – V2	V2 - R1	R1 – R6	R6 – R8

El largo del ciclo durante el año 2011-12 fue similar a las indicados por Allen *et al.* (1998) para soja en la región central de EEUU. Sin embargo se pueden apreciar algunas diferencias en la duración de las diferentes etapas con respecto a las sugeridas por estos autores. El largo del ciclo para el año 2011-12 fue de 138 días y la duración de las etapas de crecimiento fueron: inicial de 15 días, desarrollo de 32 días, medio de 48 días y final de 43 días. Allen *et al.* (1998) indicaron que la tasa de crecimiento a la cual se desarrolló la cobertura vegetal, así como el tiempo para alcanzar la cobertura completa

están afectados por las condiciones climáticas y particularmente por la temperatura diaria del aire. Una vez alcanzada la cobertura vegetal completa, la tasa adicional de desarrollo fenológico (floración, desarrollo de la semilla, madurez y senescencia) es más dependiente del genotipo que de las condiciones climáticas. El largo total del ciclo y la duración de la etapa de emergencia a floración estuvieron dentro de lo esperado para este material, en nuestras condiciones.

Se observa en la Tabla 3, que los  $K_c$  y “p” ajustados difieren de los sugeridos por Allen *et al.* (1998), aunque estas diferencias están dentro de los rangos manejados por estos autores. El  $K_c$  inicial con mayor grado de ajuste fue de 0,35 mientras que Allen *et al.* (1998) sugieren  $K_c$  para esta etapa de 0,5 con un rango recomendado entre 0,1 y 1,15, dependiendo del contenido de humedad en la superficie del suelo. La frecuencia y la magnitud de los eventos de humedecimiento del suelo y la  $ET_o$  son determinantes para el valor de  $K_c$  en esta etapa. En la etapa inicial de cultivo, en el T1 del ensayo de 2011-12 se dieron condiciones de bajo humedecimiento del suelo, tanto en la frecuencia como en la magnitud y los valores de  $ET_o$  promedio fueron de 5,7. Esto implicó condiciones deficitarias de disponibilidad hídrica para el cultivo, por lo cual es razonable esperar que el  $K_c$  inicial obtenido con mayor grado de ajuste, haya sido un valor relativamente bajo.

Vivan (2010) obtuvo valores similares para soja con  $K_c$  inicial de 0,35, Suyker y Verma (2009) presentaron resultados en los que el  $K_c$  inicial con mejor ajuste fue de 0,27 +/- 0,17 en las etapas entre siembra y la aparición de hojas. Payero y Irmak (2013) derivando el  $K_c$  de la relación  $ET_c/ET_o$  reportaron  $K_c$  iniciales para soja con valores de 0,3 a 0,85, indicando en concordancia con Allen *et al.* (1998), que los menores valores de  $K_c$  inicial fueron obtenidos con bajas PP y riego durante este período y los mayores valores del rango mencionado se obtuvieron cuando las PP y el riego fueron abundantes.

Liu *et al.* (1998) para maíz en el norte de China, Popova *et al.* (2006) y Popova y Pereira (2011) para maíz en el sur de Bulgaria y Chaterlán *et al.* (2010) para diferentes cultivos hortícolas en Cuba, reportaron ajustes de Kc inicial a menores valores de los sugeridos por Allen *et al.* (1998) al validar el modelo Winsareg. Estos autores concuerdan que el ajuste de Kc ini a menores valores se debió a que en las primeras etapas de los cultivos tuvieron un bajo humedecimiento del suelo, tanto en frecuencia como en magnitud.

El Kc medio con mayor grado de ajuste fue de 1,18, mayor al Kc medio sugerido por Allen *et al.* (1998) de 1,15, el cual está explicado por la mayor altura de planta logradas en nuestras condiciones la misma fue de 1,5 m mientras que Allen *et al.* (1998) indicaron alturas de planta de soja de 0,5 a 1 m. Como se mencionó anteriormente el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo principalmente la altura de planta, variando solo en una pequeña proporción en función del clima (Pereira 2004, Pereira *et al.* 2010, Pereira *et al.* 2015).

Payero y Irmak (2013) reportaron que el Kc medio para soja varió de 0,9 a 1,6, siendo el valor de 0,9 el que mejor ajustó cuando las PP y riegos fueron escasos y el valor de 1,6 cuando las disponibilidad hídrica para el cultivo fue elevada debido a PP y riegos abundantes. Sin embargo estos autores ponen mucho énfasis en los eventos de humedecimiento, sin indicar la altura de planta e índice de área foliar alcanzados en las diferentes situaciones. No obstante es posible inferir que en años con mayor disponibilidad hídrica, la soja presentó mayor altura de planta e índice de área foliar, esto explicaría el mejor ajuste con valores de Kc superiores.

El Kc final de 0,75 fue el que presentó mejor grado de ajuste, en esta etapa también el Kc obtenido fue superior al sugerido por Allen *et al.* (1998) de 0,5 para soja. Esta diferencia se explicó por la mayor altura de planta y mejor disponibilidad hídrica (altas y frecuentes PP) durante la etapa final del

cultivo. La mayor disponibilidad hídrica en esta etapa hace que la evaporación desde el suelo sea mayor y a su vez reduce la tasa de secado del cultivo haciendo que las hojas estén activas y evapotranspirando por más tiempo (Allen *et al.* 1998).

Allen *et al.* (1998) indican que dependiendo de los eventos de humedecimiento en esta etapa el Kc final puede alcanzar valores de 0,9. Payero y Irmak (2013) reportaron que el Kc final para soja varió de 0,3 a 1,1 para soja. El valor de 1,1 fue el que mejor ajustó cuando las PP y riegos fueron abundantes. Mientras que el menor valor de 0,3 ajustó cuando el cultivo fue expuesto a deficiencias hídricas, indicando que el estrés hídrico en esta etapa contribuye a una aceleración de la madurez del cultivo.

En relación al factor “p” se observaron diferencias en los valores ajustados con respecto a los sugeridos por Allen *et al.* (1998), aunque los mismos también están dentro del rango reportado, el cual varía entre 0,3 y 0,7 durante el desarrollo del cultivo.

En la etapa inicial el factor “p” con mejor ajuste fue de 0,4 a la siembra y 0,6 a V2. En el período comprendido entre las etapas R1 y R6 el valor de “p” con mejor ajuste fue de 0,4; mientras que en el resto del ciclo en las etapas entre V2 y R1 y en las etapas entre R6 y R8 el valor de “p” que mejor ajustó fue de 0,6.

Los “p” ajustados son coincidentes con la bibliografía que indica que la disponibilidad de agua en soja tiene mayor importancia en la germinación (Carballo de Silva 1990, Embrapa 2011) y en las etapas entre R1 y R6. En definitiva en el establecimiento del cultivo y en las etapas reproductivas que incluyen al PC de determinación del rendimiento (Andriani 2002, Mambrin *et al.* 2005, Giménez 2012).

Las semillas de soja requieren al menos 50% de su peso en agua para asegurar un adecuado funcionamiento de los mecanismos enzimáticos que

controlan la germinación, determinando que esta etapa sea más exigente en soja que en la mayoría de los cultivos.

El valor de “p” de 0,4 durante las etapas entre R1 y R6 indicó que a partir de la floración y hasta el final del llenado de grano aumentaron las necesidades hídricas de la soja y los contenidos de agua en suelo inferiores a 60% AD inciden negativamente en la ETc. Por lo tanto, en estas situaciones se comprometen negativamente la producción de MS y el rendimiento en grano. Por ese motivo los valores de “p” que mejor ajustaron durante las etapas mencionadas son elevados.

En la Tabla 4 se resumen las diferencias en cuanto a duración de las etapas observadas durante el ciclo y los valores de Kc y “p” ajustados para las diferentes etapas de desarrollo con respecto a los sugeridos por Allen *et al.* (1998).



Tabla 4: Etapas de desarrollo de soja, coeficientes de cultivo (Kc) y fracción de agotamiento de agua para no estrés ("p") propuestos por Allen *et al.* (1998) y los obtenidos en la calibración del modelo Winsareg.

Etapa de crecimiento del cultivo	De(días)	Kc	"p"	De(días)	Kc calibrado	"p" calibrado
	Allen <i>et al.</i> , 1998*	Allen <i>et al.</i> , 1998	Allen <i>et al.</i> , 1998	Observado*		
				*		
Inicial (Siembra-V2)	20	0,5	0,5	15-11	0,35	0,4
Desarrollo (V2-R1)	30/35	-	0,5	32-34	-	0,6
Medio (R1-R6)	60	1,15	0,5	48-54	1,18	0,4
Final (R6-R8)	25	0,5	0,5	43-27	0,75	0,6
Total	140			138-126		

\*De: duración de la etapa medida en días. Los valores de duración de la etapa sugeridos por Allen *et al.* (1998) son de la región central de EE.UU. \*\*Los valores de duración de la etapa nuestras condiciones para los años 2011-12 y 2013-14 respectivamente.

Como se indicó anteriormente los valores de Kc y "p" para cada etapa del cultivo, se ajustaron mediante la comparación del contenido de agua simulado por el modelo y el contenido de agua observado. En la Figura 3 se presenta la evolución del contenido de agua en el suelo simulado por el modelo Winsareg al utilizar los Kc y "p" ajustados en la calibración y el contenido de agua en el suelo observado.

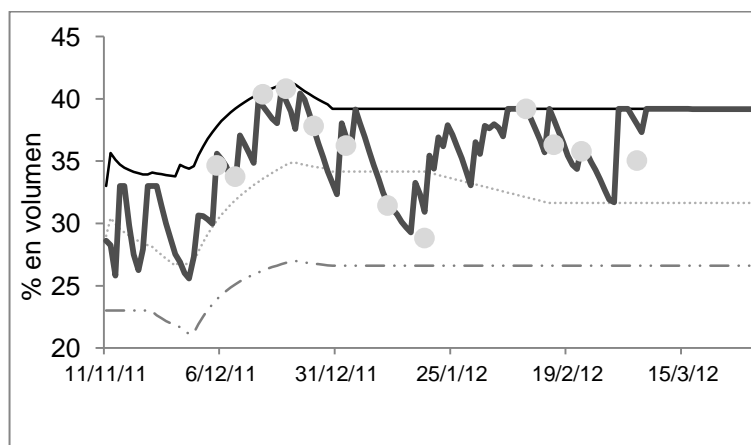


Figura 3: Evolución del contenido de agua en el suelo (% en volumen) simulado (—) y observado (•) en el tratamiento con bienestar hídrico (T1) para la temporada 2011-12, (—) contenido de agua a capacidad de campo (CC); (...) “p” fracción de agotamiento de agua disponible sin estrés; (-·-·-) PMP punto de marchitez permanente.

En la Figura 3 se observa que los valores de agua en el suelo observados son similares a los valores de agua en el suelo simulados por el modelo, para todo el ciclo. Por ese motivo se puede indicar que existe una buena concordancia entre el contenido de agua en el suelo observado y el simulado por el modelo, al utilizar los parámetros de ajustados “Kc” y “p” para cada etapa de desarrollo del cultivo (Tabla 1).

Para juzgar de manera precisa el grado de predicción del modelo se realizó una comparación entre los valores simulados y los observados, la representación gráfica de la misma se presenta en la Figura 4.

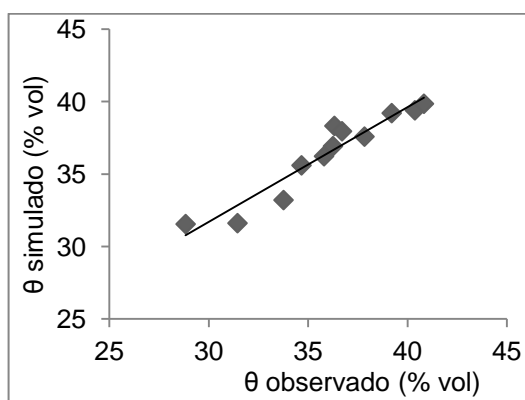


Figura 4: Lineal 1:1 para la calibración del modelo WinIsareg del contenido de agua en el suelo, en el tratamiento de bienestar hídrico del experimento de soja de la temporada 2011-12.

Los resultados observados en la Figura 4 muestran que la simulación del contenido de agua del suelo se ajustó bien a los valores observados, sin indicios de tendencias de sobre o sub estimación por parte del modelo.

El grado de ajuste lo podemos observar a través de los indicadores estadísticos que relacionan los valores pre dichos por el modelo y los obtenidos en la medición, los cuales se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Indicadores estadísticos obtenidos en la calibración al comparar el contenido de agua en el suelo simulado y observado. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ); coeficiente de regresión (b); error absoluto medio (AAE); raíz cuadrada media del error (RCME); relación de la raíz cuadrada media del error (Rel RCME); Índice de Willmott (d); Eficiencia (EF).

	$R^2$	b	AAE (% vol.)	RCME (% vol.)	RelRCME (%)	d	EF
Calibración	0,87	1,01	0,97	1,35	3,75	0,95	0,83

Los indicadores estadísticos indican un buen grado de ajuste de los valores de contenido de agua en el suelo simulados por el modelo con respecto a los valores observados. Cuando el coeficiente de regresión (b) está cerca de 1, AAE y RCME menores a 5% y Willmott y EF cercanos a 1, significa que los valores simulados están estadísticamente cerca de los observados, mientras que un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) alto, cercano a 1 indica que la mayor parte de la variación de los valores observados se explica por el modelo.

Como puede observarse en la Tabla 5 el ajuste estadístico para la calibración del modelo fue adecuado, presentó valores similares a los sugeridos por Cai *et al.* (2007), Rivas y Carmona (2010), Stockle *et al.* (2004), indican que un modelo tiene un buen ajuste cuando:  $R^2 \geq 0,80$ ; b está cerca de 1 ( $1 \pm 0,1$ ) y el índice de Willmott "d"  $\geq 0,95$ .

Liu *et al.* (1998), indicaron que el modelo WinIsareg en maíz estaba calibrado cuando obtuvo valores de  $R^2$  de 0,82; b de 0,99; AAE de 5,5%. Por su parte, Popova y Pereira (2011) al calibrar el modelo para maíz, aportaron que tuvieron un buen ajuste del modelo cuando obtuvieron valores de  $R^2$  de

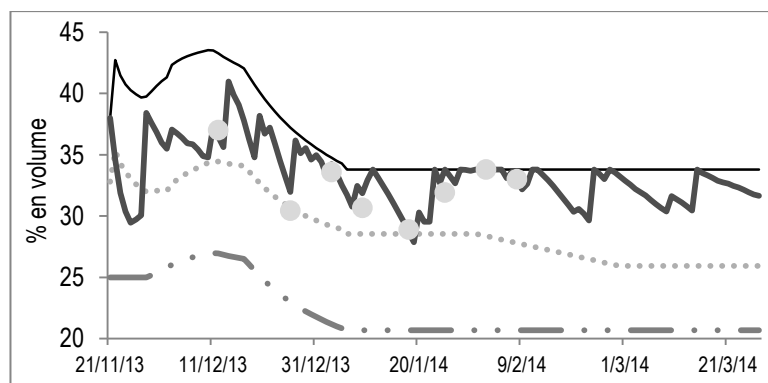
0,92; b de 1,01; RMSE (cm cm<sup>-3</sup>) de 0,01; AAE de 0,01; Eficiencia de 0,91 e índice de Willmott “d” de 0,98. Los índices de ajustes utilizados por estos autores para calibrar el modelo WinIsareg presentaron resultados similares a los logrados en esta evaluación.

Por lo que se puede inferir con un alto grado de confianza que los valores de Kc y “p” ajustados, permiten al modelo WinIsareg simular adecuadamente el balance de agua en el suelo para soja.

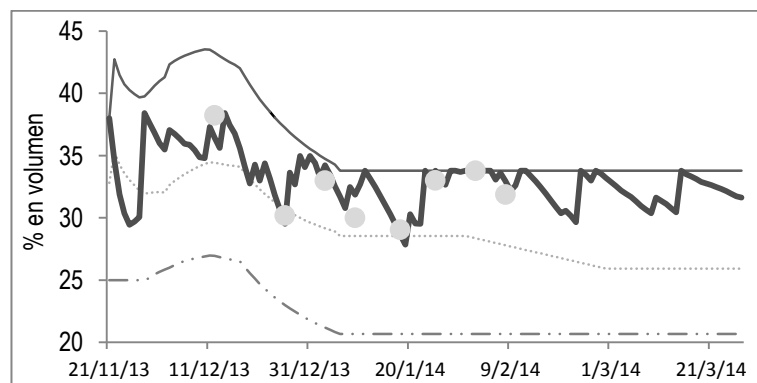
### 3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO WINISAREG

Como puede observarse en la Figura 5, para los tres tratamientos evaluados en la validación (T1, T4 y T5) se logró un buen ajuste en el contenido de agua en el suelo, entre los valores simulados por el modelo y los valores observados, al utilizar los de Kc y los “p” obtenidos en la calibración.

a)



b)



c)

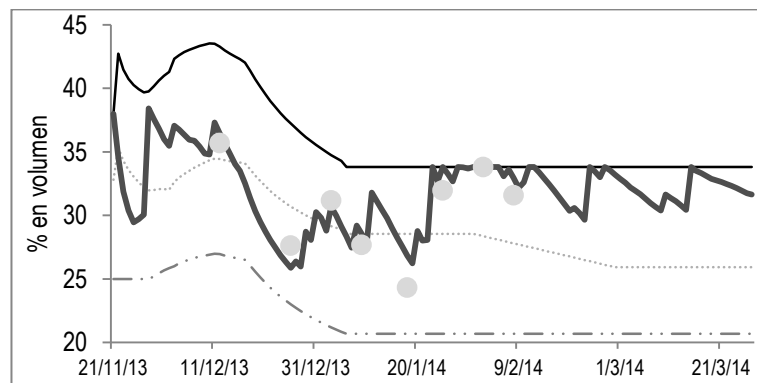


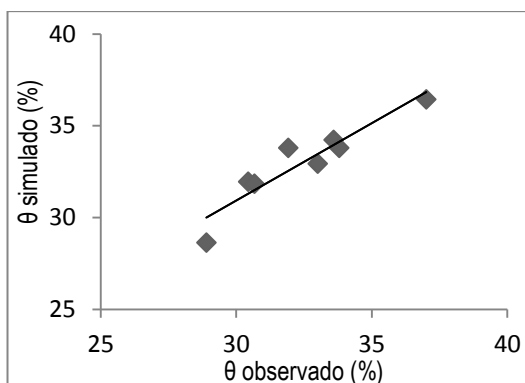
Figura 5: Evolución del contenido de agua en el suelo (% en volumen) simulado (—) y observado (·) a lo largo del ciclo para la temporada 2013-14, relativo a la validación para a) T1: bienestar hídrico, b) T4: riego deficitario 50% de cada riego del T1 y c) T5: secano; (—) CC capacidad de campo; (···) “p” fracción de agotamiento de agua disponible sin estrés; (— · —) PMP punto de marchitez permanente.

Por lo que se puede decir que al utilizar los parámetros ajustados en la calibración de  $K_c$  y “p” para cada etapa de desarrollo del cultivo, el modelo

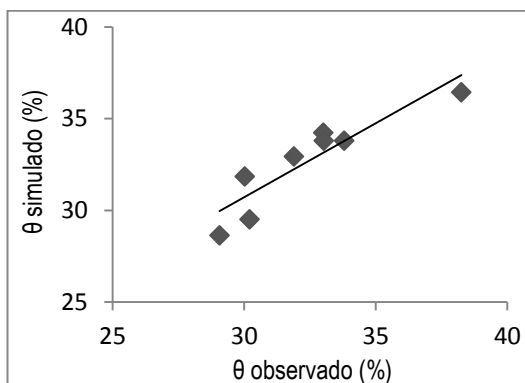
simula correctamente el balance de agua en el suelo para diferentes situaciones de riego o secano en soja.

En la Figura 6 se comparan en una línea 1:1 los valores de agua en el suelo simulados por el modelo con los valores observados, en diferentes tratamientos de riego en soja a saber: bienestar hídrico (T1) y riego deficitario (T4) y secano (T5) en el año agrícola 2013/14.

a)



b)



c)

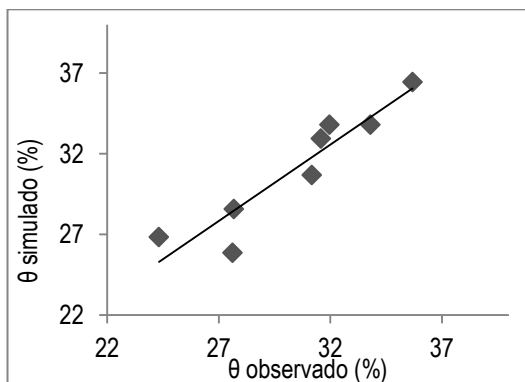


Figura 6: Lineal 1:1 para la validación del modelo Winsareg del contenido de agua en el suelo, en el tratamiento 1 (T1): de bienestar hídrico (a), en el tratamiento 4: riego deficitario 50% del riego realizado en el T1 (b) y en el tratamiento 5: seco (c) del experimento de soja de la temporada 2013-14.

En la Figura 6 se observa un buen ajuste de los valores simulados y observados del contenido de agua en el suelo para los dos tratamientos con riego (T1 y T4) y seco (T5).

Para evaluar la exactitud de las simulaciones del modelo Winsareg, se calcularon diferentes índices estadísticos los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Indicadores estadísticos obtenidos en la validación al comparar el contenido de agua en el suelo simulado y observado en el año 2013-14 para los tratamientos T1 (bienestar hídrico); T4 (riego deficitario 50% de T1); T5 (secano). Coeficiente de determinación ( $R^2$ ); coeficiente de regresión (b); error absoluto medio (AAE); raíz cuadrada media del error (RCME); relación de la raíz cuadrada media del error (Rel RCME); Índice de Willmott (d); Eficiencia (EF).

	$R^2$	b	AAE (% vol)	RCME (% vol)	RelRCME (%)	d	EF
<b>T1</b>	0,87	1,02	0,76	1,00	3,09	0,95	0,82
<b>T4</b>	0,83	1,01	0,98	1,14	3,53	0,95	0,82
<b>T5</b>	0,87	1,02	1,20	1,43	4,68	0,96	0,83

Para los tratamientos evaluados en el año agrícola 2013-14, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fueron superiores a 0,83 y los coeficientes de regresión (b) fueron cercanos a 1. La estimación de los errores fue baja, observándose valores del error absoluto medio (AAE) menores a 1,2 % en volumen; de la raíz cuadrada media del error (RCME) menores 1,43 % en volumen y de la relación de la raíz cuadrada media del error (Rel RCME) menor a 5%. Mientras que el índice de Willmott (d) fue mayor a 0,95 y eficiencia (EF) mayor a 0,82.

Liu *et al.* (1998) reportaron valores similares al validar el modelo Winsareg para maíz lograron un  $R^2$  de 0,86; b de 1,01; AAE (%) de 5,1. Popova y Pereira (2011) al validar el modelo Winsareg para maíz, indicaron que tuvieron un buen ajuste del modelo cuando el  $R^2$  fue de 0,92; b de 1,02; RMSE (cm cm<sup>-3</sup>) de 0,01; AAE de 0,01; Eficiencia de 0,89 e índice de Willmott “d” de 0,97.

Paredes *et al.* (2014) al calibrar y validar el modelo AcuaCrop tomaron como criterio los valores sugeridos por Ma *et al.* (2011) de: RMSE  $\leq$  15%; AAE  $\leq$  10%;  $R^2 \geq$  0,80; EF  $\geq$  0,70, los cuales presentan menor grado de ajuste que los obtenidos en este ensayo.



Como se puede observar en la Tabla 6 los indicadores de ajuste están dentro de los rangos propuestos por Cai *et al.* (2007), Rivas y Carmona (2010), Stockle *et al.* (2004),  $R^2 \geq 0,80$ ; b está cerca de 1 ( $1 \pm 0,1$ ) y el índice de Willmott “d”  $\geq 0,95$  y similares a los utilizados por Liu *et al.* (1998), Popova *et al.* (2006), Chaterlán *et al.* (2010) y Popova y Pereira (2011) para calibrar y validar el modelo Winsareg y a los utilizados por Paredes *et al.* (2014). Esto permite indicar que se obtuvo un buen ajuste del modelo en la simulación del contenido de agua en suelo.

Por lo visto y discutido anteriormente se puede indicar que el modelo Winsareg es una herramienta útil y sencilla que permite estimar el BH de suelos y calcular las necesidades de agua en soja bajo diferentes tratamientos de riego o secano en nuestras condiciones de producción.

Sin embargo, se debe considerar que determinar los Kc para las diferentes etapas de soja, como especie, es difícil debido a las diferencias morfológicas entre los GM. Giménez (2007) utilizando GM (III, IV, V, VI y VII) para diferentes fechas de siembras y localidades indicó diferencias en largo del ciclo que fueron desde 126 días para GM III hasta 147 días para GM VII, con variaciones en las diferentes etapas VE-R1 de 35 días GM III a 80 días GM VII; R1-R6 desde 54 días GM III a 87 días GM VII y R6-R8 desde 19 días GM III a 42 días GM VII. Ceretta y Mandl (2002) analizando la altura de planta para diferentes GM (III a VI) indicaron que las mismas pueden variar de 0,55 m hasta 1,3 m dependiendo el GM. Yeates *et al.* (2006), Yeates *et al.* (2009), Payero e Irmak (2013) indicaron que para la aplicación de la metodología de FAO-56 para estimar la ETc (Allen *et al.*, 1998) nos apoyamos en valores de Kc que se derivan principalmente de las mediciones de campo registradas muchos años atrás. Desde entonces, las variedades de los principales cultivos como soja, algodón y maíz han cambiado significativamente en aspectos morfológicos. Por lo que los Kc de las diferentes etapas de desarrollo a utilizar deben necesariamente ser validados con resultados de campo en cada región de estudio.

También es necesario mencionar que no es totalmente correcto el expresar la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico como una función de la fracción “p”. En realidad, la tasa de extracción del agua por parte de las raíces está influenciada más directamente por el nivel de energía potencial del agua del suelo (potencial matricial del suelo y la conductividad hidráulica asociada), que por el contenido de agua (Allen *et al.*, 1998). Kramer (1974) indica que a igual potencial de matriz, el contenido de humedad del suelo puede tener grandes variaciones entre suelos con diferentes texturas. Por lo que teniendo en cuenta la gran variabilidad de suelos que tenemos en Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976), habría que realizar evaluaciones para distintos tipos de suelos.

### 3.3. SIMULACIONES DEL MODELO WINISAREG

Como ya se mencionó anteriormente las principales simulaciones del modelo Winlsareg son la ET<sub>c</sub>, la evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>a</sub>) y las necesidades netas de agua de riego (NNR) que es la sumatoria de los aportes hídricos que precisan los cultivos para alcanzar la ET<sub>c</sub>.

Los datos experimentales no fueron utilizados para analizar los diferentes tratamientos y no se poseen mediciones exactas de la ET<sub>c</sub> total a lo largo del ciclo. En base a los resultados logrados en la calibración y validación podemos decir que el modelo Winlsareg es una herramienta confiable para estimar la evolución del contenido de agua del suelo en soja, tanto en riego como en secano, en las condiciones de producción del litoral del país. En base a ello, podemos utilizar las principales salidas del modelo (ET<sub>c</sub>, ET<sub>a</sub>) para hacer algunas consideraciones con respecto al consumo de agua de soja.

Al ajustar los valores de K<sub>c</sub> y “p”, la ET<sub>a</sub> simulada por el modelo Winlsareg para nuestras condiciones fue similar a los datos reportados por Giménez y García (2011), Giménez *et al.* (2014).

Giménez y García (2011) para soja GM VI, utilizando el modelo WInlsareg para una serie de 23 años obtuvieron una ETa promedio que varió entre 409 y 443 mm para Colonia y Salto, respectivamente, al utilizar los Kc y “p” sugeridos por Allen *et al.* (1998). Mientras que la ETc simulada fue de 627 y 641 mm para Colonia y Salto, respectivamente. Por lo que las NNR fueron de 218 y 184 mm para Colonia y Salto.

Posiblemente si se utilizaran los Kc y “p” ajustados en este ensayo para la misma serie de años que Giménez y García (2011), las diferencias entre la ETc y ETa serían mayores, debido a que los Kc obtenidos en la calibración fueron más elevados que los propuestos por Allen *et al.* (1998).

En la Tabla 7 se presentan la ETc y la ETa simuladas por el modelo WInlsareg, al utilizar los Kc y p calibrados, para el tratamiento de bienestar hídrico en el año 2011-12 y para los diferentes tratamientos de riego a saber: bienestar hídrico durante todo el ciclo y riego deficitario que fue el 50% del riego realizado en el tratamiento de bienestar hídrico y para condiciones de secano en el año 2013/14.

Tabla 7: Evapotranspiración de cultivo (ETc) y evapotranspiración real del cultivo (ETa) de soja simulado por el modelo Winlsareg para diferentes tratamientos de riego: bienestar hídrico (T1), riego suplementario (T4) 50% del riego realizado en el T1 y en condiciones de secano (T5), para los dos años agrícolas utilizados 2011-12 y 2013-14.

Año	2011-12		2013-14	
Tratamiento	T1	T1	T4	T5
Siembra-V2	28,3	15,5	15,5	15,2
V2-R1	148,4	150,0	147,5	118,6
R1-R6	295,8	266,4	266,1	244,9
R6-R8	110,6	67,2	67,1	65,9
ETa Total ciclo	583,3	499,3	496,4	444,7
ETc	604,5	508,3	508,3	508,3
ETa/ETc	0,930	0,982	0,977	0,875

En la Tabla 7 se puede observar que el tratamiento de secano fue el que presentó mayor diferencia entre la ETc y ETa, a pesar de que, como vimos anteriormente 2013-14 fue un año con precipitaciones superiores a la media.

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que aproximadamente el 55% de la ETa de soja se produjo durante el periodo de R1 a R6. Iguales resultados fueron reportados por Karam *et al.* (2005), esto indica la importancia del agua para este periodo, el cual es determinante en la concreción del rendimiento.

#### 4. CONCLUSIONES

La metodología utilizada mostró ser eficiente para calibrar y validar el modelo WInlsareg para soja en las condiciones ambientales de producción del litoral del país. Mediante la comparación del contenido de agua en el suelo simulado por el modelo WInlsareg con el observado, se logró determinar los  $K_c$  y los “ $p$ ” para las etapas inicial, media y final de soja del GM V.

El modelo WInlsareg es una herramienta útil y sencilla que permite estimar el BH de suelos y calcular las necesidades de agua de cultivos bajo diferentes condiciones de riego y secano.

Dada la gran variabilidad de los suelos del país y la amplitud de los GM de soja, se deberían realizar evaluaciones del modelo utilizando la metodología propuesta en este trabajo, con otros GM y regiones agro-climáticas. De esa manera se dispondría de información de mayor solidez para aplicar el modelo en el manejo del agua en soja en las diferentes regiones de producción de Uruguay.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Agorio C, Cardellino G, Corsi W, Franco J. 1988. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total. En: Agorio C, Cardellino G, Corsi W, Franco J. (Eds. I). Estimación de las necesidades de riego en Uruguay. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 1-110.
- Allen RG, Pruitt WO, Wright JL, Howell TA, Ventura F, Snyder R, Itenfisu D, Steduto P, Berengena J, Yrisarry JB, Smith M, Pereira LS, Raes D, Perrier A, Alves I, Walter I, Elliott R. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO 56 Penman- Monteith method. *Agricultural Water Management*. 81:1-22.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper n° 56. Rome. FAO. 300 p.
- Altamirano A, Da Silva H, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo. MAP. DSF. 96 p.
- Andrade FH, Aguirrezabal L, Rizzalli R. 2000. Crecimiento y rendimiento comparado. En: Andrade FH, Sadras VO. (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Argentina. Editorial Médica Panamericana S.A. 61-96.
- Andrade FH, Sadras VO. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade FH, Sadras VO. (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Argentina. Editorial Médica Panamericana S.A. 98-193.
- Andriani JM. 2002. Estrés hídrico en soja. *IDIA XXI*. 3: 48-51.
- Andriani JM, Andrade FH, Suero EE, Dardanelli JL. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. Their effects on dry matter accumulation, and its components. *Agronomie*. 11:77-746.
- Arbeletche P, Coppola M, Paladino C. 2012. Análisis del agro-negocio como forma de gestión empresarial en América del Sur: el caso uruguayo. *Agrociencia Uruguay*. 16 (1): 110-119.
- Arbeletche P, Gutiérrez G. 2011. Crecimiento de la agricultura en Uruguay: exclusión social o integración económica en redes. *Revista Pampa*. 6: 113 - 138.

- Arbeletche P, Carballo C. 2006. Los cambios en la agricultura de secano del nuevo siglo en Uruguay. Facultad de Agronomía. UdelaR. 15 p.
- Baccino G, Formoso F. 2002. Inserción del riego por gravedad en los sistemas de producción agropecuaria. Montevideo. Instituto Plan Agropecuario. MGAP. Programa de Servicios Agropecuarios, INIA, IPA, PRENADER. 40 p.
- Baigorri H. 2009. Manejo del cultivo de Soja. En: García F, Ciampitti I, Baigorri H. Manual de manejo del cultivo de Soja. 1ra edición. Buenos Aires, Facultad de Ciencias Agropecuarias - UNC. 17-32.
- Baigorri H, Croatto D. 2000. Manejo del cultivo de soja en Argentina. Marcos Juárez, INTA. 28 p.
- Board JE, Modali H. 2004. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. *Crops Science*. 45: 1790-1799.
- Boyer J. 1982. Plant productivity and environment. *Science Agronomie*. 218: 443-448.
- Cai J, Liu Y, Lei T, Pereira LS. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*. 145: 22-35.
- 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 enero de 2015. Disponible en <http://www2.ufpel.edu.br/faem/agrociencia/v8n3/artigo02.pdf>
- Carballo de Silva L. 1990. Manejo del riego en soja sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. *Agronomía Tropical*. 40: 35-56.
- Cárcova J, Abeledo LG, López M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (Eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires. Facultad de Agronomía. U.B.A. 75-98.
- Carlesso R. 2010. Manejo del riego y asesoramiento al regante: riego suplementario y siembra directa. En: *Seminario Internacional (1º, 2010, Paysandú, Uruguay)*. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 103-114.
- Castaño JP, Ceroni M, Giménez A, Furest J, Aunchayna R. 2010. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (En línea).

- Montevideo, INIA. 28 p. Consultado 2 febrero 2015. Disponible en [http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara\\_agro/index.html](http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara_agro/index.html)
- Ceretta S, Mandl A. 2002. Adaptación de cultivares de soja en Uruguay. Jornada de girasol y soja. Serie Actividades de difusión. Montevideo. INIA La Estanzuela. N° 297.
- Chaterlán Y, Duarte CE, López T, Paredes P, Pereira LS. 2010. Determining of Crop Coefficients for Horticultural Crops in Cuba through Field Experiments and Water Balance Simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 19 (1): 90-95.
- Chipana R, Osorio A. 2007. Necesidades de agua y programación de los riegos: avances basados en nuevas tecnologías de la información. En: Emilio Ruz, Luis Santos Pereira. (Eds.) *Modernización de riegos y uso de tecnologías de información: síntesis de resultados*. Montevideo. PROCISUR/IICA. 9-13.
- Cholpankulov ED, Inchenkova OP, Paredes P, Pereira LS. 2008. Cotton irrigation scheduling in Central Asia: model calibration and validation with consideration of groundwater contribution. *Irrigation and Drainage*. 57: 516-532.
- Cirilo AG, Andrade FH, Uhart SA, Gaggiotti M. 1992. Rendimiento y partición de materia seca en maíz bajo diferentes fechas de siembra. *Actas V Congreso Nacional de Maíz*, Pergamino li: 11-19.
- Dardanelli J, Severina I, Andriani J. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo. Su rol en la optimización del riego suplementario. En: Seminario Internacional (1º, 2010, Paysandú, Uruguay) *Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas*. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 19-28.
- Dardanelli J, Collino D, Otegui ME, Sadras VO. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de granos. En: Satorre EH, Benech Arnold RL, Slafer GA, de La Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (Eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Argentina. Facultad de Agronomía. U.B.A. pp. 377-406.
- Della Maggiora AI, Gardiol JM, Irigoyen AI. 2000. Requerimientos hídricos. En: Andrade FH, Sadras VO. (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Balcarce. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP. pp: 155-171.



- Desclaux D, Roumet P. 1996. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. *Field Crops Research*. 46: 61-70.
- DIEA-MGAP (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2014. Producción [En línea]. En: Anuario estadístico agropecuario 2014. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 20 febrero 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2.diea.diea-anuario-2014.O.es.0>.
- DIEA-MGAP (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2012. Producción [En línea]. En: Anuario estadístico agropecuario 2012. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Consultado 20 febrero 2014. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2.diea.diea-anuario-2012.O.es.0>.
- DNM-MDN. 2014. MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL. DIRECCIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA. Características climáticas. (En línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 enero 2014. Disponible en <http://www.meteorologia.gub.uy>
- Dogan E, Kirnak H, Copur O. 2007. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. *Field Crops Research*. 103: 154-159.
- Doorenbos J, Kassam AH. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* n° 33. Roma. FAO. Pp: 5–45.
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. *FAO Irrigation and Drainage Paper* n° 24. Roma. FAO. (Ed. 4). 144p.
- Doss GS, Pearson RW, Roggers HT. 1974. Effect of soil water stress at various growth stages on soybeans yield. *Agronomy Journal*. 66 (2): 297-299.
- Dos Santos Gomez AC. 2007. Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob a cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na região de Santiago, RS. Dissertação de mestrado. Santa Maria, RS, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). 133 p.
- Durán A. 1986. Los suelos del Uruguay. Montevideo. Edit. Agropecuaria Hemisferios Sur S.R.L. pp.398.
- Embrapa. 2011. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2012 e 2013. - Londrina: Embrapa Soja, 2011. 261 p.

- Ernst O. 2009. Hacia una agricultura inteligente y sostenible. Zona Agropecuaria. 19: 27 - 29.
- Evett SR. 2007. Soil Water and Monitoring Technology. In: ASA-CSSA-SSSA. Irrigation of Agricultural Crops 2nd ed. Agronomy Monograph. 30: 25-84.
- Failde A, Peixoto C, Estol E, Preve A. 2013. Estudio sobre riego agropecuario en Uruguay. Montevideo. Uruguay. FAO – Red Mercosur de Investigaciones Económicas. 17p.
- FAO. 2014. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. (En Línea). Roma. Consultado 5 enero 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s00.htm#TopOfPage>
- FAO. 2003. Descubrir el Potencial del Agua para la Agricultura. (En Línea) Roma. Consultado 5 enero 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s00.htm#Contents>
- Farias JRB, Nepomuceno AL, Neumaier N, Tobita S, De Almeida IR. 2006. Restricioes da disponibilidade hidrica a obtencao de elevados rendimientos de graos de soja. En: Mesa Técnica Ecofisiología y Climatología (3er., 2006, Rosario, Aregentina). Congreso de Soja del Mercosur. Rosario, Argentina. Mercosoja. 238-241.
- Fassio A, Baccino G, Ceretta S.1992. Resultados de experimentación en maíz con riego. Aguas Blancas, 1991/92. Jornadas de Cultivos de Verano, INIA, La Estanzuela.
- Fehr WR, Caviness CE. 1977. "Stages of soybean development". Special Report 80. Iowa State University, Ames, Iowa. 11 pp.
- Frederick JR, Bauer PJ, Camp C. 2001. Drought-stress effects on branch and mainstem seed yield and yield components of determinate soybean. Crop Science. 41: 759-763.
- García M. 2012. Conceptos básicos para el diseño y el manejo del riego En: Seminario Internacional (2°, 2012, Salto, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 23-32.
- García y García A, Persson T, Guerra L, Hoogenboom G. 2010. Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern. Agricultural Water Management. 97: 981-987.
- García H, Ferrarotto M. 2009. Efecto del déficit hídrico sobre la acumulación de biomasa y nitrógeno en soya (*Glycine max*) inoculada con *Bradirhizobium japonicum*. (en línea). Aragua, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. pp. 21-27. Consultado 21 de enero

de 2015. Disponible en [http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_agro/article/view/130/108](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/130/108)

- Genta JL, Failache N. 2010. Disponibilidad de agua en Uruguay: Variabilidad – Predicción – Institucionalidad. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 177-182.
- Genta JL, Teixeira L. 2001. Inundaciones y drenaje urbano – Uruguay. En: Tucci CEM, Bertoni JC. eds. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre, Brasil. Asociación Brasileira de Recursos Hídricos. p. irr.
- Gerster G, Bacigaluppo S. 2009. Cómo alcanzar altos rendimientos en soja. INTA. Para Mejorar la Producción. 42: 63-67.
- Giménez L, Canosa G, Prieto C, Grasso JP, Montero A, Rameau M, Rosa A, Arévalo R. 2014. Respuesta al riego suplementario en cultivos de verano y evaluación de pérdidas de rendimiento por deficiencias hídricas. En: Riego suplementario en cultivos y pasturas. Serie FPTA-INIA 55. Montevideo. 9-28.
- Giménez L. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? En: Seminario Internacional (2°, 2012, Salto, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 33-41.
- Giménez L, García M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia (Montevideo). 15(2): 100-108.
- Giménez L. 2011. Efectos del estrés hídrico en diferentes etapas de desarrollo soja. [Datos sin publicar].
- Giménez L. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 29-37.
- Giménez L, García M. 2009. Estudio de las necesidades hídricas de los cultivos de verano en Uruguay. En: Simposio Nacional de Agricultura de Secano. (1°, 2009, Paysandú, Uruguay). I Simposio Nacional de Agricultura de Secano. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía, EEMAC. pp. 17-32.
- Giménez L. 2007. Comportamiento fenológico de diferentes grupos de madurez de soja (*Glicine max*) en Uruguay. Ubicación temporal del período crítico. Agrociencia.11: 1-9.

- Giménez L. 2004. Potencial de rendimiento de maíz para grano. I. Disponibilidad hídrica. Revista Cangüé N° 26. E.E.M.A.C. Facultad de Agronomía.
- Hadley P, Roberts EH, Summerfield RJ, Michin FR. 1984. Effects of temperature and photoperiod on flowering in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill): A quantitative model. *Annals of Botany*. 53: 669 - 681.
- Hillel D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. 771 pp.
- Hofstadter R, Gonnet M. 1980. Efectos de diferentes regímenes de riego en la producción de maíz (*Zea mays* L.) En. Reunión Técnica de la Facultad de Agronomía. Montevideo.
- Hussein F, Janat M, Yakoub A. 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Journal of Agricultural*. 9(4): 1319-1330
- INASE (Instituto Nacional de Semillas) – INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2014. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja. (En línea). En: Resultados de Evaluación Convenio INIA-INASE. 2014. Montevideo. Consultado 10 enero 2015. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/Evaluacion\\_CV/Ano2013/PubSoja2013.pdf](http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2013/PubSoja2013.pdf)
- INASE (Instituto Nacional de Semillas) – INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2013. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja. (En línea). En: Resultados de Evaluación Convenio INIA-INASE. 2013. Montevideo. Consultado 10 enero 2015. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/Evaluacion\\_CV/Ano2012/PubSoja2012.pdf](http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2012/PubSoja2012.pdf)
- INASE (Instituto Nacional de Semillas) – INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2012. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja. (En línea). En: Resultados de Evaluación Convenio INIA-INASE. 2012. Montevideo. Consultado 10 enero 2015. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/Evaluacion\\_CV/Ano2011/PubSojaPeriodo2011.pdf](http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2011/PubSojaPeriodo2011.pdf)
- INASE (Instituto Nacional de Semillas) – INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2011. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja. (En línea). En: Resultados de Evaluación Convenio INIA-INASE. 2011. Montevideo. Consultado 10

enero 2015. Disponible en:  
[http://www.inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/Evaluacion\\_CV/Ano2010/PubSojaPeriodo2010.pdf](http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2010/PubSojaPeriodo2010.pdf)

INASE (Instituto Nacional de Semillas) – INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2010. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja. (En línea). En: Resultados de Evaluación Convenio INIA-INASE. 2010. Montevideo. Consultado 10 enero 2015. Disponible en:  
[http://www.inia.org.uy/convenio\\_inase\\_inia/Evaluacion\\_CV/Ano2009/PubSojaPeriodo2009.pdf](http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CV/Ano2009/PubSojaPeriodo2009.pdf)

Jain SK, Sudheer KP. 2008. Fitting of hydrologic models: A close look at the Nash-Sutcliffe Index. *Journal of Hydrologic Engineering*. 13: 981-986.

Jensen ME, Burman RD, Allen RG. 1990. (ed.). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. New York, ASCE (American Society of Civil Engineers). 360p.

Kantolic AG, Giménez, de la Fuente EB. 2003. Periodo crítico para la definición del rendimiento. En: Satorre EH, Benech Arnold RL, Slafer GA, de La Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (Eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires. Facultad de Agronomía U.B.A. pp. 189-192.

Kantolic A, Slafer G. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja; número de granos en soja y la sensibilidad al fotoperiodo en etapas reproductivas. En: Satorre EH, Benech Arnold RL, Slafer GA, de La Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (Eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires. Facultad de Agronomía. U.B.A. pp. 186-187.

Karam RM, 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.

Kirchner JW, Hooper RP, Kendall C, Neal C, Leavesley G. 1996. Testing and validating environmental models. *Science of the Total Environment*. 183: 33-47.

Kramer JP. 1974. *Relaciones hídricas de suelo y planta*. México DF. Edutex. 538 p.

- Krause P, Boyle DP, Base F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 5: 89-97.
- Legates DR, McCabe Jr GJ. 1999. Evaluating the use of goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. 35: 233-241.
- Liu Y, Pereira LS, Fernando RM. 2006. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. *Agricultural Water Management*. 84: 27-40.
- Liu Y, Teixeira JL, Zhang HJ, Pereira LS. 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 36, 233–246.
- Loague, K. y Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal Contaminant Hydrology*. 7: 51-73.
- Ma L, Ahuja LR, Saseendran SA, Malone RW, Green TR, Nolan BT, Bartling PNS, Flerchinger GN, Boote KJ, Hoogenboom G. 2011. A Protocol for parameterization and calibration of RZWQM2 in field research. En: Ahuja LR, Ma L. (Eds.). *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research*. Madsion, ASA,CSSA and SSSA, WI. pp. 1–64.
- 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.
- Micucci F, Taboada MA, Gil R. 2004. 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.
- 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.
- Molfino JH, 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 enero 2015. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/renare>.

- Mondino M, Gómez D. 2006. Evolución de la intercepción de la radiación incidente y la producción de biomasa en soja de siembras extra tempranas a diferentes espaciamientos. En: Congreso de Soja del MERCOSUR (MercoSoja 2006) (3°. 2006, Buenos Aires, Argentina). Mesa Técnica Ecofisiología y Climatología. Entre Ríos, Argentina. Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp. 83-86.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50: 885-900.
- Neyshabouri MR, Hatfield JL. 1986. Soil-water deficits effects on semideterminate and indeterminate soybean growth and yield. *Field Crops Research*. 15: 73-84.
- Otegui ME. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. En: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1°, 2009, Paysandú, Uruguay). I Simposio Nacional de Agricultura de Secano. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía, EEMAC. pp. 7- 16.
- Otero A, Goñi C. 2009. Uso de Modelos en el Balance Hídrico de los Suelos a nivel predial. En: Reduciendo Incertidumbres: el riego en la productividad de los cítricos. INIA. Actividades de Difusión. 576: 13-19.
- Paredes P, Pereira SL. 2010. Water balance and irrigation scheduling simulation model. The WinISAREG model. CEER-Biosystems Engineering. Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon. 68p.
- Paredes P., de Melo-Abreu J.P., Alves I., c., 2014. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*. 144: 81–97.
- Payero JO, Irmak S. 2013. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agricultural Water Management* 129: 31– 43.
- Penman HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A*. 193:120–214.
- Pereira LS, Allen RG, Smith M, Raes D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. Review. *Agricultural Water Management*. 147: 4-20.

- Pereira LS, de Juan JA, Picornell MA, Tarjuelo JM. 2010. El Riego y sus Tecnologías. (En Línea) Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete. Consultado 4 enero 2015. Disponible en: <http://crea.uclm.es/crea2/sp/index.php>
- Pereira LS, Alves I. 2005. Crop water requirements. En: Hillel D. (ed.) Encyclopedia of Soils in the Environment. London and New York, Elsevier. pp. 322-334.
- Pereira A. 2004. The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for reference evapotranspiration. Agricultural and Forest Meteorology. 125: 305-313.
- Pereira LS, Teodoro PR, Rodrigues PN, Teixeira JL. 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. En: Rossi G, Cancelliere A, Pereira LS, Oweis T, Shatanawi M, Zairi A. (Eds.) Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions. Kluwer, Dordrecht. pp. 161-180.
- Pereira LS, van den Broek BJ, Kabat P, Allen RG. 1995. Crop-Water Simulation Models in Practice. Wageningen Pers, Wageningen.
- Pérez del Castillo C. 2014. Inserción internacional del Uruguay. Realidades, desafíos y estrategias (En línea). 10 enero 2015. <http://www.ccuruguayusa.com/wpcontent/uploads/2014/12/PEREZDELCTILLOTRABAJODEINVESTIGACION.pdf>
- Popova Z, Pereira LS. 2011. Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. Agricultural Water Management. 98: 675 – 683.
- Popova Z, Eneva S, Pereira LS. 2006. Model validation, crop coefficients and yield response factors for irrigation scheduling based on long-term experiments. Biosystems Engineering. 95 (1): 139-149.
- Ritter A, Muñoz-Carpena R, Regalado C M. 2010. Capacidad de la predicción de modelos aplicados a la ZNS: Herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. 10: 259-264.
- Rivas R, Carmona F. 2010. La ecuación de Priestley- Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. Boletín Geológico y Minero. 121: 401 - 412.
- Romero R. 2000. Necesidades de agua de riego en maíz. Tecnología de producción de cultivos y pasturas bajo riego. Serie de Actividades de Difusión N° 227. INIA. La Estanzuela.



- Rosadi RA, 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.
- Roselli S, Texeira J. 1998. Efecto del manejo del agua de riego sobre las características productivas del maíz para grano. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 86 p.
- Sadras VO, Ferreiro M, Gutheim F, Kantolic A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperiodo. En: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.
- Salinas IA. 2010. Riego suplementario en cultivos extensivos, panorama de Argentina y experiencia en la región central del país. En: Seminario Internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 39-48.
- Salvagiotti F. 2009. Manejo de soja de alta producción. Santa Fe, INTA. 2 p.
- Santhi C, Arnold JG, Williams JR, Dugas WA, Srinivasan R. Hauck LM. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*. 37(5): 1169–1188.
- Santos D. 2009. Tolerancia al déficit hídrico, fijación biológica de nitrógeno y algunos mecanismos que los relacionan en soja. Estación Experimental Agropecuaria Paraná. 7 p.
- Sawchik J. 2012. Necesidades de riego en cultivos y pasturas En: Seminario Internacional (2°, 2012, Salto, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. Montevideo. INIA. 55-68.
- Sawchik J, Ceretta S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. Jornada Técnica de Cultivos de Verano. Serie de Actividades de Difusión. Montevideo. INIA. 41-45 pp.
- Sawchik J, Formoso F. 2000. Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas. Serie de Actividades de Difusión. Montevideo. INIA. 227: 13-25 pp.
- Scott HD, Ferguson JA, Wood S. 1987. Water use, yield, and dry matter accumulation by determinate soybean grown in a humid region. *Agronomy Journal*. 79: 870–875.

- Sionit K, Kramer PJ. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agronomy Journal*. 69: 274–278.
- Smith M. 1991. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO. Guidelines for prediction of crop water requirements. Roma. FAO. 54 p.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Roma. FAO. 530p. (Estudio FAO: riego y drenaje; n° 66).
- Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*. 18: 289-307.
- Suyker AE, Verma SB. 2009. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 443–452.
- Sweeney DW, Long JH, Kirkham MB. 2003. A single irrigation to improve early maturing soybean yield and quality. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 235–240.
- Teixeira JL, Pereira LS. 1992. ISAREG, an irrigation scheduling simulation model. *International Commission on Irrigation and Drainage*. 41 (2): 29-48.
- Van Liew MW, Arnold JG, Garbrecht JD. 2003. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *American Society of Agricultural Engineers*. 46: 1539-1551.
- Vega CRC, Andrade FH. 2000. Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras. En: Andrade FH, Sadras VO. Eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, INTA/UNMP. pp. 97-133.
- Vivan G A. 2010. Resposta da irrigação suplementar em diferentes cenários para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2010.
- Willmott CJ. 1981. On the validation of models. *Physical Geographer*. 2: 184 - 194.
- Yeates S, Richards D, Roberts J, Gregory R. 2006. Progress in Evaluating the Moisture Stress Response of Bollgard II compared with

Conventional Cotton. En: (13<sup>th</sup>, 2006, Australian Cotton Conference). Queensland, Australian Cotton Growers Research Association. pp 1-5.

Yeates S, Roberts J, Neilsen J, Richards D. 2009. Toward better water management of Bollgard II cotton. The Australian Cotton Grower. 22–27.

## 6. ANEXOS

### ANEXO 1

## **Evaluación del modelo de simulación Winlsareg para soja en el litoral oeste del Uruguay.**

Grasso Joaquín<sup>1</sup>, Giménez Luis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Profesional independiente, Varela 853, 50000 Salto, Uruguay. Correo electrónico: [jgrasso83@gmail.com](mailto:jgrasso83@gmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Producción Vegetal. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3, km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: [kapoexe@fagro.edu.uy](mailto:kapoexe@fagro.edu.uy)

Winlsareg: evaluación para soja en Uruguay.

### **Resumen**

El riego es una práctica tecnológica que permite aumentar los rendimientos en soja. El objetivo del trabajo fue calibrar y validar el modelo Winlsareg para soja en el litoral del país. El modelo estima las necesidades de agua de cultivos bajo diferentes condiciones de riego o secano, mediante la simulación del balance hídrico (BH) de suelos. La información de suelo, cultivo, y clima, utilizada en la evaluación del modelo fue obtenida durante las temporadas 2011-12 y 2013-14. La evaluación consistió en ajustar los Kc y los “p” para las fases de desarrollo (inicial, media y final) de soja, de forma tal que las diferencias entre los valores observados y simulados del contenido de agua del suelo fueran mínimas. El Kc inicial ajustado fue 0,35, el Kc medio 1,18 y el Kc final 0,75. Los “p” ajustados fueron de 0,4 para las fases germinación y R1-R6 y de 0,6 para el resto del ciclo. Los Kc y “p” ajustados permitieron lograr una elevada concordancia entre los valores simulados por el modelo y los valores observados del contenido hídrico del suelo para la calibración y la validación con diferentes situaciones de disponibilidad hídrica. El coeficiente de regresión (b) fue cercano a 1, la estimación de errores AAE y RCME fueron menores a 5%, el coeficiente de Willmott y la EF cercanos a 1 y un R<sup>2</sup> mayor a 0,83. El resultado de los indicadores estadísticos permite afirmar con certeza el buen funcionamiento del modelo en soja para el litoral del país.

**Palabras claves:** planificación de riego, Glycine max, manejo del agua.

1

---

<sup>1</sup> Se publicará en Agrocencia Uruguay

## Summary

### Evaluation of the simulation model WinSAREG for soybean on the west coast of Uruguay.

Irrigation is a technological practice that allows both the increase the yield in soybean. The aim of this study was to calibrate and validate the model WinSareg for soybean in the west area of the country. This model allows to estimate the crop water requirements under different irrigation scheduling or rainfed. The information (soil-climate-crop) used to evaluate the WinSareg model was obtained during the 2011-12 and 2013-14 periods. The assess consist of searching the Kc and the "p" relative to the inicial, mid and end season crop development stages that provide minimal differences between observed an simulated soil water content. The inicial Kc whit better adjustment was of 0,35, the mid Kc was of 1,18 and the end season Kc was of 0,75. The value of "p" was 0,4 in the phases germination and R1-R6, while in the rest of the cycle was 0,6. High concordance between the simulated and observed values of soil water content was obtained by using the Kc and "p" calibrated.. The coefficients of regression (b) was very close to 1, the estimation errors AAE and RCME were less than 5%, the Willmott coefficient and the EF were also close to 1 and R<sup>2</sup> higher than 0,83. The result of statistical indicators can say with certainty the proper simulate of the model in soybean in the west area of the country.

**Keywords:** irrigation schedule, Glycine max, water management.

## Introducción

El estrés hídrico es considerado uno de los factores más importantes que limitan el crecimiento y el rendimiento de las plantas en el mundo (Boyer, 1982). En las condiciones de producción del Uruguay las deficiencias hídricas son la principal limitante para la obtención del rendimiento potencial en el cultivo de soja (Agorio *et al.*, 1988; Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García, 2011; Giménez, 2012). Las mismas afectan el rendimiento a través de la disminución en la acumulación de materia seca y por los efectos negativos sobre la tasa de crecimiento del cultivo y la fijación biológica de nitrógeno, que es especialmente vulnerable a las deficiencias de agua (Santos, 2009; Giménez, 2012).

---

El riego suplementario es una práctica tecnológica que permite aumentar y estabilizar los rendimientos, en la medida que se utilice adecuadamente. Dada la escasa literatura sobre este tema en el país y la creciente importancia del riego en cultivos resulta imprescindible poner a punto herramientas que permitan optimizar los rendimientos y el uso del agua (Agorio *et al.*, 1988; Sawchik y Ceretta, 2005; Giménez y García, 2011; Giménez, 2012).

La programación y el cálculo de las necesidades de riego en base sólo a parámetros del suelo como el contenido de humedad, presenta limitaciones en tanto no se consideran otros factores determinantes de la dinámica del agua que requieren un monitoreo continuo en el tiempo. Por esta razón para desarrollar el cálculo ajustado de las necesidades de riego se utiliza el balance hídrico (BH) de suelos. El BH es un método preciso para calcular las necesidades de riego de un cultivo, integrando aspectos de suelos, cultivo y clima (Pereira *et al.*, 1995; Allen *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2010; Sawchik, 2012).

El modelo de simulación WInlsareg (Teixeira y Pereira, 1992) es una herramienta útil y sencilla que permite estimar el BH de suelos y en base a éste calcular las necesidades de agua de los cultivos bajo diferentes tratamientos de riego o secano, así como también programar la gestión del riego para máximos rendimientos o para condiciones de aplicación de agua limitada (Liu *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 2003; Popova *et al.*, 2006; Chaterlán *et al.*, 2010; Popova y Pereira, 2011). El BH de suelos en el modelo WInlsareg se desarrolla en base a lo sugerido por Doorenbos y Pruitt (1977) y descrito por Teixeira y Pereira (1992) y Liu *et al.* (1998). La versión del modelo utilizada por Pereira *et al.* (2003) adopta la metodología para computar la ETC y las necesidades de riego propuestas por Allen *et al.* (2006).

Para realizar el BH del suelo se requiere información climática acerca de la precipitación efectiva ( $P_e$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ). La  $E_{To}$  se calcula en base al método de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) y se llevan a cabo con el programa complementario, EVAPOT. Asimismo se requiere información del cultivo, a saber: fechas de ocurrencia de las etapas de desarrollo y los coeficientes de cultivos ( $K_c$ ) correspondientes a cada etapa (inicial, media y final); máxima profundidad radicular ( $Z_r$ ) y la fracción de AD en el suelo que permite la evapotranspiración sin restricciones o sea el factor de agotamiento de agua en el suelo para no estrés “ $p$ ” (Doorenbos y Pruitt, 1977). Por otra parte, se requiere información sobre el suelo, en el modelo se hace referencia a un suelo de varias capas u horizontes y para cada horizonte se debe ingresar la profundidad respectiva ( $d$ ) y el contenido de agua a capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad total de almacenamiento de agua disponible (CAAD).

Los modelos de simulación previamente a ser utilizados a nivel comercial o experimental deben ser calibrados y validados en las condiciones de suelo-planta-clima donde serán usados (Liu *et al.*, 1998; Pereira *et al.* 2003; Popova *et al.*, 2006; Chaterlán *et al.*, 2010; Ritter *et al.*, 2010; Popova y Pereira, 2011).

El modelo WinSareg ha sido utilizado para diferentes cultivos y varias regiones del mundo; previa evaluación del mismo para las condiciones de aplicación a través de comparar el volumen de agua simulado por el modelo con el observado en el suelo (Liu *et al.*, 1998; Popova *et al.*, 2006; Chaterlán *et al.*, 2010; Popova y Pereira, 2011). Sin embargo la literatura no registra antecedentes en relación a la calibración del modelo en soja. Esto puede ser consecuencia de que la soja en general se cultiva mayoritariamente en condiciones de

secano. El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo WInlsareg para soja en el litoral del país de manera de contribuir a mejorar el manejo del agua de riego en el cultivo.

## Materiales y métodos

Para evaluar el modelo WInlsareg en soja, se utilizaron los datos provenientes de los experimentos de Manejo de agua y riego de soja realizados en la Estación Experimental “Dr. M. A. Cassinoni” (EEMAC) de la Facultad de Agronomía, ubicada en Paysandú (32° 22' S, 58° 4' W) durante las zafras 2011-12 y 2013-14. La información climática fue provista a partir de una estación meteorológica automática Vantage Pro 2tm, modelo 6510 (Davis Instruments, Hayward, ca), ubicada aproximadamente a 2000 m del campo experimental de riego de la EEMAC, excepto las PP que fueron medidas en un pluviómetro en el sitio experimental.

Los datos climáticos utilizados para realizar las simulaciones con WInlsareg fueron: ETo (mm d<sup>-1</sup>) y PP (mm d<sup>-1</sup>) diarias, se presentan en las Figuras 1 y 2 respectivamente los valores acumulados mensuales.

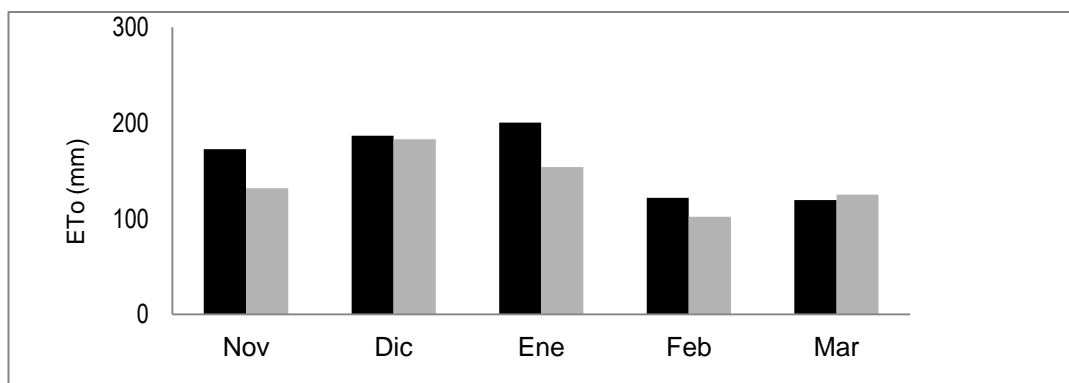


Figura 1. Evapotranspiración de referencia (ETo, mm) mensual entre los meses noviembre y marzo para los años 2011-12 (barras negras) y 2013-14 (barras grises).



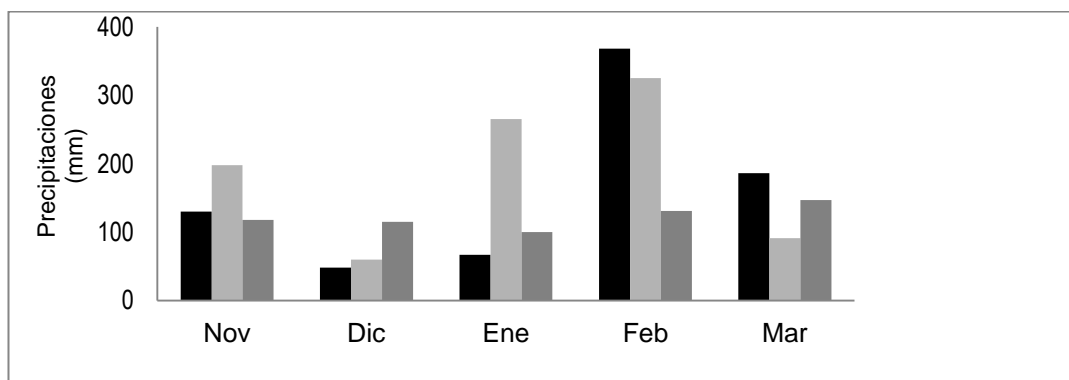


Figura 2. Precipitaciones (mm) promedio mensuales en Paysandú para el periodo noviembre-marzo para la serie histórica 1961 a 2009 (columna gris oscuro), para el campo experimental de riego de la EEMAC en el año 2011-12 (columnas negras) y para el año 2013-14 (columnas gris claro).

El suelo del campo experimental de riego de la EEMAC se caracterizó como un Brunosol sub-éutrico típico (Fine, thermic, superactive, mixed, Pachic Argiudoll), perteneciente a la formación Fray Bentos y a la unidad San Manuel en la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay escala 1:1000.000, (Altamirano *et al.*, 1976). Las principales características hídricas del suelo se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características hídricas del suelo.

Horizonte	Profundidad (m)	CC (% vol.)	PMP (% vol.)	CAAD (% vol.)
A	0-0,20	27	14	26
B	0,20-0,60	45	30	60
C	0,60-0,75	32	22	15
Total	0,75			101

CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; CAAD: Capacidad de almacenamiento de agua disponible, expresados como % en volumen de suelo.

La CC y el PMP para cada horizonte del perfil del suelo, se utilizaron como datos de entrada en el modelo Winsareg.

El contenido de agua en el suelo fue monitoreado mediante un equipo de sonda de neutrones CPN modelo 503DR HIDROPROBE. Las mediciones de agua se realizaron cada 0,1 m, en tubos de acceso de aluminio de un m de longitud y dos pulgadas de diámetro. La fecha en que se realizaron los muestreos fueron: 5/12, 9/12, 15/12, 20/12, 26/12, 2/1, 11/1, 19/1, 10/2,

16/2, 22/2 y 5/3 para el año agrícola 2011-12 y 12/12, 26/12, 3/1, 9/1, 18/1, 25/1, 2/2 y 8/2 para el año agrícola 2013-14.

Previamente a la utilización del equipo se construyó una curva de calibración para el suelo del campo experimental. Para ello se midió el contenido de humedad a través del método gravimétrico y se realizaron las lecturas a las mismas profundidades con sonda de neutrones, obteniendo una curva de calibración del equipo ajustada con  $R^2= 0,95$  (Giménez, 2010).

Los ensayos se sembraron el 11 y el 21 de noviembre de 2011 y 2013 respectivamente, con una sembradora experimental, 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 un ajuste manual de plantas con el objetivo de lograr una población de 300.000 pl.ha<sup>-1</sup>.

Los cultivos se mantuvieron libres de plagas, malezas y enfermedades y fueron fertilizados para que no presentaran restricciones nutricionales de manera de que el crecimiento, desarrollo y rendimiento sólo se modificara en respuesta a los cambios en la disponibilidad hídrica.

Los tratamientos (T) evaluados en los ensayos realizados fueron los siguientes:

T1 = Sin deficiencias hídricas en el todo el ciclo, con el contenido de agua en el suelo igual o superior a 60% AD durante el periodo crítico (PC) e igual o superior a 40% AD en las etapas no críticas (ENC).

T2 = Deficiencias hídricas desde VE-R4 (Fehr y Caviness, 1977), el contenido de agua del suelo entre 20% y 40 % de AD y de 60% de AD o más durante el PC.

T3 = Deficiencias hídricas etapas vegetativas y PC, el contenido de agua en suelo entre 20% y 40% de AD desde VE a R4 y 60% de AD o más durante el PC y 40% de AD o más entre R1 y R2.

T4= Riego deficitario, el contenido de agua en el suelo varió de acuerdo a las PP y al riego que implicó la mitad del volumen aplicado en el T1 en cada riego y durante todo el ciclo.

T5= Secano.

Para la aplicación de la metodología experimental consideramos el PC de determinación del rendimiento a las etapas comprendidas entre los estadios R4 y R6 (Kantolic *et al.*, 2003).

El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones. Las unidades experimentales fueron 15 y estuvieron constituidas por 5 hileras del cultivo de 5 m de longitud, sembradas con una distancia entre hileras de 0,4 m.

Para obtener los umbrales hídricos de suelo definidos, se realizaron dos tipos de intervenciones en el % AD de los tratamientos: riego suplementario utilizado cuando los niveles de agua en suelo fueron inferiores a los % AD planificados y la contención de las PP en los tratamientos con déficit hídrico planificado, a través de la utilización de simuladores de sequía (rain shelters) parcelarios y móviles. Los mismos fueron contruidos con estructuras de hierro cubiertas con lonas impermeables, las estructuras fueron diseñadas con techos a dos aguas, dos paredes laterales, una frontal y una trasera. Las dimensiones de los simuladores se adecuaron al tamaño de las parcelas siendo estos de 2 m x 5 m x 1,5 m. Estos fueron colocados sobre las parcelas de cultivo, en las que se definieron etapas con deficiencias hídricas, antes de cada evento de PP y retirados inmediatamente después de los mismos, de modo de no provocar transformaciones significativas en las condiciones de

radiación solar y temperaturas. 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, de modo de impedir la entrada de agua proveniente del escurrimiento. Y también fueron construidos desagües para evacuar los excesos de agua provenientes del escurrimiento superficial y de los techos de los simuladores.

El método de riego utilizado fue un sistema de goteo, lo que permitió agregar agua con precisión en el volumen y en la etapa de desarrollo definida. Cada hilera de cultivo dispuso de una cinta de goteros con un caudal de  $1,47 \text{ l h}^{-1}$ , espaciados cada 0,20 m.

Para determinar la lámina de riego a aplicar se realizó un BH de suelos de paso diario, de acuerdo a la siguiente fórmula:  $\Delta \text{H}_2\text{O} = \text{R} + \text{PP} - \text{ET}_c$ , siendo  $\Delta \text{H}_2\text{O}$  la variación del agua en el suelo (mm), R= riego (mm), PP= precipitaciones (mm) y  $\text{ET}_c$ = evapotranspiración de cultivo (mm), calculada por el método  $\text{ET}_c = \text{ET}_o \times \text{K}_c$  de FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006). Durante el desarrollo del cultivo el mismo fue monitoreado determinando la fecha de ocurrencia de cada una de las etapas fenológicas del mismo. Asimismo, se determinó la altura de planta para cada etapa, producción de MS y rendimiento total en grano.

Para los objetivos de este trabajo solo se utilizaron los datos del BH del suelo, fenología del cultivo, profundidad radicular y altura de planta (Allen *et al.*, 2006).

Los experimentos descritos anteriormente se realizaron independiente del modelo a evaluar. Esta independencia proporciona condiciones adecuadas para poner a prueba el modelo (Liu *et al.*, 1998).

El proceso de evaluación se realizó siguiendo la metodología descrita por Liu *et al.* (1998), la cual fue adoptada también por Popova *et al.* (2006), Chaterlán *et al.* (2010) y Popova y Pereira (2011).

La calibración consistió en determinar los valores de los coeficientes de cultivo "Kc" y los factores de agotamiento de agua disponible sin estrés "p", para cada etapa de desarrollo del cultivo (inicial, media y final), que conducen a un mayor ajuste de los valores del contenido de agua del suelo observados y simulados por el modelo. En la calibración se utilizó la base de datos de la temporada 2011-12 y el tratamiento de bienestar hídrico (T1).

Una vez ajustados los Kc y los "p" en el proceso de calibración se procedió a validar el modelo. Para la validación se corrió el modelo con la base de datos del año 2013-14 para los tratamientos T1, T4 y T5, usando los valores de Kc y "p" ajustados en la calibración. El modelo se consideró ajustado cuando los indicadores estadísticos calculados a partir del contenido de agua del suelo simulado por el modelo y el medido (observados), presentaron valores acordes con la bibliografía (Liu *et al.*, 1998; Popova *et al.*, 2006; Chaterlán *et al.*, 2010; Ritter *et al.*, 2010; Popova y Pereira, 2011).

Para realizar las simulaciones de BH del suelo, el modelo fue cargado con los parámetros de clima (ETo y PP), suelos (CC, PMP y profundidad de cada horizonte), cultivos (calendario de eventos fenológicos y profundidad radicular) y riego (fecha y volumen), para cada año. El contenido de agua en el suelo fue medido con sonda de neutrones en las fechas antes mencionadas.

Para las comparaciones entre el contenido de agua en el suelo simulado por el modelo y el contenido de agua del suelo observado, se utilizaron los siguientes índices estadísticos de ajuste:

Coefficiente de regresión forzado del original (b),

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2}$$

Coefficiente de determinación ( $R^2$ ),

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0,5} (\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)^{0,5}} \right]^2$$

Error absoluto medio (AAE),

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i$$

Raíz cuadrada media del error (RCME),

$$RCME = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5}$$

Relación de la Raíz cuadrada media del error (Rel RCME),

$$Rel RCME = \left[ \frac{RCME}{\bar{O}} \right] 100$$

Índice de Willmott “d”,

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

Eficiencia (EF),

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Dónde:  $P_i$  = valores simulados;  $O_i$  = valores observados;  $n$ : número de medidas, para los pares de datos observados y simulados.

## Resultados y Discusión

En el Cuadro 2 se presentan los valores de  $K_c$  y “ $p$ ” que mostraron el mejor grado de ajuste para cada etapa de desarrollo del cultivo y la fecha de ocurrencia de las mismas.

Cuadro 2. Coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) y fracción de agotamiento de agua disponible en el suelo sin estrés (“ $p$ ”) ajustados en la calibración y ubicación temporal de las etapas de desarrollo del cultivo en 2011-12.

	Etapas de crecimiento del cultivo			
	Inicial	De desarrollo	Medio	Final
$K_c$	0,35	0,35-1,18	1,18	0,75
“ $p$ ”	0,4-0,6	0,6	0,4	0,6
Ubicación temporal de la etapa	11 Nov–26 Nov	27Nov–29 Dic	30 Dic–15 Feb	16 Feb–30 Mar

En la Figura 3 se muestra la evolución del contenido de agua en el suelo simulado por el modelo Winsareg al utilizar los  $K_c$  y los “ $p$ ” ajustados en la calibración y el contenido de agua en el suelo observado para la temporada 2011-12 en el T1 (a) y para temporada 2013-14 en T1 (b), T4 (c) y T5 (d).

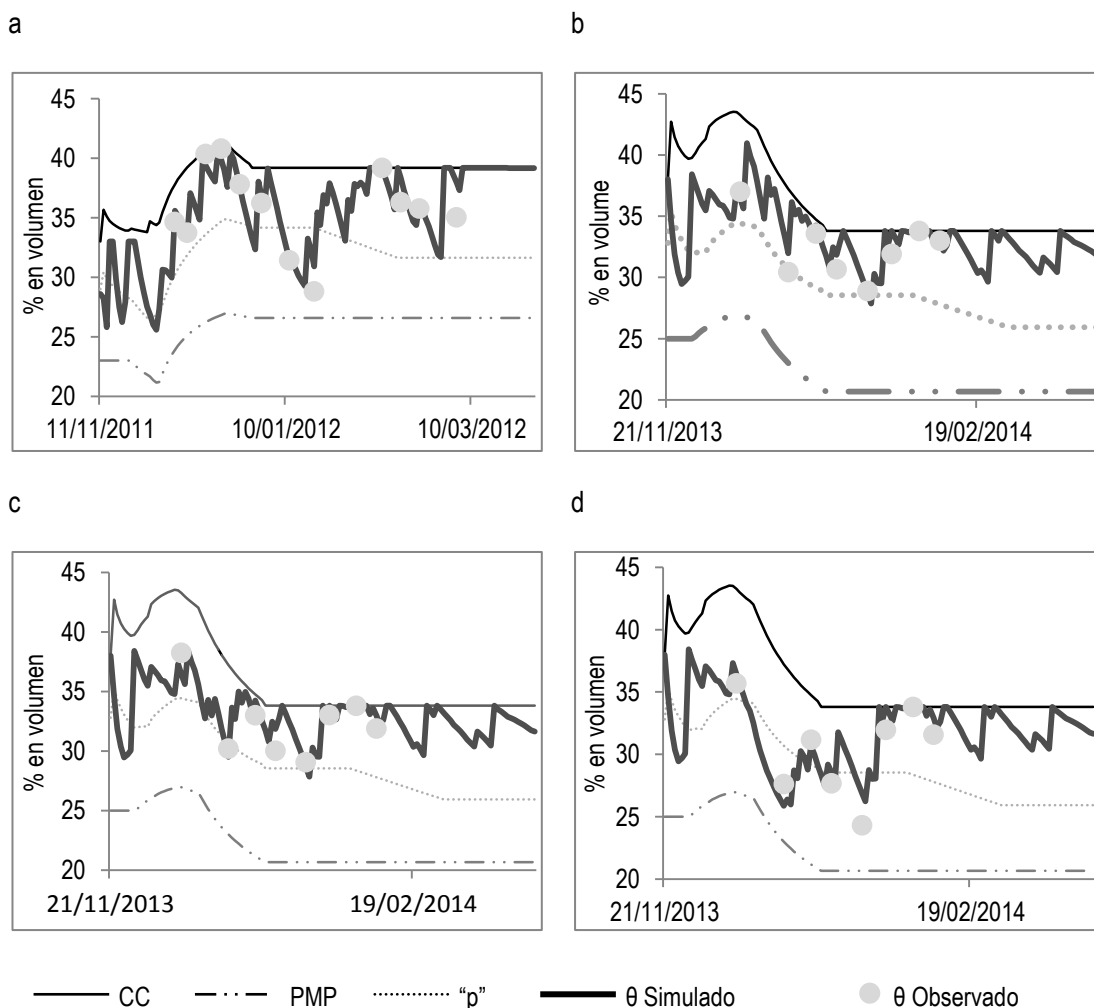


Figura 3. Evolución del contenido de agua en el suelo (% en volumen) simulado (-) y observado (●) a) para el año 2011-12, relativo a la calibración y para el año 2013-14, relativo a la validación para b) T1: bienestar hídrico, c) T4: riego deficitario 50% de cada riego del T1 y d) T5: seco; (-) CC capacidad de campo; (···) "p" fracción de agotamiento de agua disponible sin estrés; (- - -) PMP punto de marchitez permanente.

Los contenidos de agua en el suelo simulados y observados son similares, para los diferentes tratamientos evaluados. Por lo que se puede inferir que para las condiciones de los experimentos al utilizar los parámetros calibrados  $K_c$  y "p" para cada etapa de desarrollo, el modelo simula correctamente el BH de suelos para las diferentes situaciones de riego y seco de soja.

En la Figura 4 se presenta la comparación de los valores de agua en el suelo simulados por el modelo con los valores observados en una línea 1:1, obtenidos en la calibración con el T1



(a) en el año 2011-12 y en la validación en los diferentes tratamientos de riego evaluados a saber: T1 (b), T4 (c) y T5 (d) en el año 2013-14.

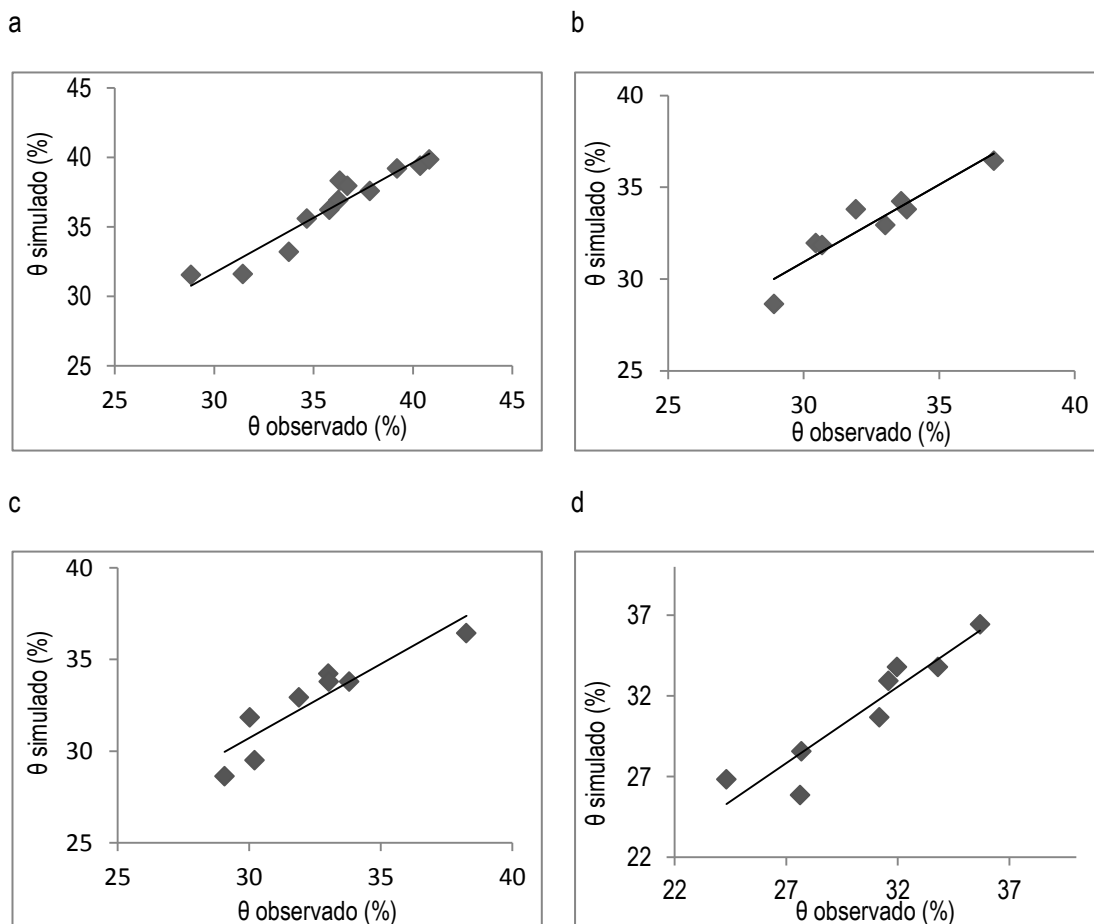


Figura 4. Lineal 1:1 del contenido de agua en el suelo para la calibración del modelo Winsareg, en el tratamiento de bienestar hídrico del experimento de soja de la temporada 2011-12 (a) y para la validación del modelo Winsareg, en el tratamiento 1, bienestar hídrico (b), en el tratamiento 4, riego deficitario (c) y en el tratamiento 5, seco (d) del experimento de soja de la temporada 2013-14.

En la Figura 4 se observa un buen ajuste del contenido de agua en el suelo simulados y observados para la calibración y la validación en las diferentes situaciones de disponibilidad hídrica.

Para evaluar la exactitud de las simulaciones del modelo Winsareg, se calcularon varios índices estadísticos los cuales se presentan en la Cuadro 3. Estos indicaron un buen ajuste

entre el contenido de agua en el suelo simulado y observado, el coeficiente de regresión (b) es cercano a 1, mientras que la estimación de los errores fue baja AAE y RCME menores a 5% y Willmott y EF cercanos a 1. A su vez el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) elevado superior a 0,8 indica que la mayor parte de la variación de los valores observados está explicada por el modelo.

Cuadro 3. Coeficientes de determinación ( $R^2$ ); coeficientes de regresión (b); error absoluto medio (AAE); raíz cuadrada media del error (RCME); relación de la raíz cuadrada media del error (Rel RCME); índice de Willmott (d) y Eficiencia (EF), obtenidos al comparar el contenido de agua en el suelo simulado y observado, en la calibración del modelo WInlsareg para soja, año 2011-12 en T1 (bienestar hídrico) y en la validación del modelo, año 2013-14 para los tratamientos T1 (bienestar hídrico); T4 (riego deficitario); T5 (secano).

	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>AAE (% en volumen)</b>	<b>RCME (% en volumen)</b>	<b>RelRCME (%)</b>	<b>Willmott</b>	<b>EF</b>
Calibración							
T1	1,01	0,87	0,97	1,35	3,75	0,95	0,83
Validación T1	1,02	0,87	0,76	1,00	3,09	0,95	0,82
Validación T4	1,01	0,83	0,98	1,14	3,53	0,95	0,82
Validación T5	1,02	0,87	1,20	1,43	4,68	0,96	0,83

Los resultados logrados permiten inferir con un alto grado de confianza que los valores de Kc y “p” ajustados, permiten al modelo WInlsareg simular adecuadamente el BH de suelos para soja bajo las condiciones en las que se desarrollaron los experimentos.

En el Cuadro 3 se observa que los Kc y “p” ajustados difieren de los sugeridos por Allen *et al.* (2006), sin embargo estas diferencias están dentro de los rangos posibles manejados por estos autores. El Kc inicial con mayor grado de ajuste fue de 0,35 mientras que Allen *et al.* (2006) sugieren para esta etapa valores de Kc de 0,5 con un rango recomendado entre 0,1 y 1,15, dependiendo del contenido de humedad en la superficie del suelo. La frecuencia y magnitud de los eventos de humedecimiento del suelo y la ETo son determinantes para el Kc en esta etapa. En la etapa inicial de cultivo, en el T1 del ensayo de la temporada 2011-12 ocurrieron condiciones de bajo humedecimiento del suelo, tanto en la frecuencia como en la

magnitud y los valores de ETo promedio fueron de 5,7. Esto implicó una situación de disponibilidad hídrica deficitaria para la soja, por lo cual es razonable esperar que el Kc inicial obtenido con mayor ajuste, haya sido un valor relativamente bajo como 0,35.

El Kc medio obtenido con mejor ajuste fue de 1,18 mayor al Kc medio sugerido por Allen *et al.* (2006) de 1,15, el cual está explicado por la altura de planta en las condiciones de los experimentos en Uruguay, ya que la altura promedio de planta fue ampliamente superior a las utilizadas por Allen *et al.* (2006), quienes indican alturas de planta de soja entre 0,5 y 1 m. Como se mencionó anteriormente el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, principalmente la altura de planta, variando solo una pequeña proporción en función del clima (Pereira *et al.*, 2003; Pereira *et al.*, 2010).

El Kc final que presentó mejor grado de ajuste fue de 0,75, en esta etapa también el Kc obtenido fue superior al sugerido por Allen *et al.* (2006) de 0,5 para soja. Esta diferencia se explicó por la mayor altura de planta y mejor disponibilidad hídrica (altas y frecuentes PP) durante la etapa final del cultivo. La mayor disponibilidad hídrica en esta etapa provocó que la evaporación desde el suelo sea mayor y a su vez se reduzca la tasa de secado del cultivo provocando que las hojas se encuentren activas por más tiempo y por lo tanto evapotranspirando (Allen *et al.* 2006). Allen *et al.* (2006) indicaron que dependiendo de los eventos de humedecimiento en esta etapa el Kc final puede alcanzar valores de 0,9.

En relación al factor "p" se observaron diferencias en los valores ajustados con respecto a los sugeridos por Allen *et al.* (2006), aunque los mismos también están dentro del rango reportado por estos autores, el cual varía entre 0,3 y 0,7 durante el desarrollo del cultivo.

En la etapa inicial el factor “p” con mejor ajuste fue de 0,4 a la siembra y 0,6 a V2. En el período comprendido entre R1-R6 el valor de “p” logrado fue de 0,4; mientras que en el resto del ciclo en las etapas entre V2 y R1 y en las etapas entre R6 y R8 el valor de “p” que mejor ajustó fue de 0,6.

Los valores de “p” ajustados en este trabajo son coincidentes con la bibliografía que indica que la disponibilidad de agua en soja tiene mayor importancia en la germinación (Carballo de Silva 1990) y en las etapas entre R1 y R6. En definitiva, en el establecimiento del cultivo y en las etapas reproductivas que incluyen al PC de determinación del rendimiento (Andriani, 2002; Mambrin *et al.*, 2005; Giménez, 2012).

El valor de “p” de 0,4 durante las etapas entre R1 y R6 indicó que a partir de la floración y hasta el final del llenado de grano aumentaron las necesidades hídricas de la soja y los contenidos de agua en suelo inferiores a 60% de AD inciden negativamente en la ETc. Por lo tanto, en estas situaciones se compromete negativamente la producción de materia seca y el rendimiento en grano. Por esos motivos los valores de “p” que mejor ajustaron durante las etapas mencionadas fueron elevados.

## **Conclusiones**

La metodología propuesta por Liu *et al.* (1998), mostró ser eficiente para desarrollar la calibración y la validación del modelo Winsareg para soja en las condiciones agro-climáticas del litoral del país. Por medio de la comparación del contenido de agua en el suelo simulado por el modelo Winsareg con el observado, se logró calibrar y validar el mismo a través de la determinación de los valores de Kc y de “p” para las etapas inicial, media y final del ciclo de desarrollo de soja del GM V.

El modelo Winsareg es una herramienta útil y sencilla que permitió estimar el BH de suelos y calcular las necesidades de agua de soja bajo diferentes condiciones de riego y de secano.

En consideración a la variabilidad de los GM utilizados en el país y a las diferentes características hídricas de los suelos en los que se desarrolla el cultivo, sería recomendable evaluar el modelo Winsareg con otros GM y en suelos diferentes, esto permitiría ampliar la certeza del funcionamiento de esta herramienta de simulación para el manejo del agua en soja en el país.

## Bibliografía

- Agorio C, Cardellino G, Corsi W, Franco J.** 1988. Estimación de las necesidades de riego en Uruguay: I. Magnitud y frecuencia de la lámina neta total. Montevideo-MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 110p.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M.** 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. FAO. 298p. (Estudio FAO: Riego y drenaje; 56).
- Altamirano A, Da Silva H, Echeverría A, Panario D, Puentes R.** 1976. Clasificación de suelos del Uruguay. MAP. DSF. t.1, 96 p.
- Andriani JM.** 2002. Estrés hídrico en soja. IDIA XXI. 3: 48-51.
- Boyer J.** 1982. Plant productivity and environment. Science Agronomie. 218: 443-448.
- Carballo de Silva L.** 1990. Manejo del riego en soja sembrada en suelos arenosos de la mesa de guanipa. Agronomía Tropical. 40: 35-56.
- Chaterlán Y, Duarte CE, López T, Paredes P, Pereira LS.** 2010. Determining of Crop Coefficients for Horticultural Crops in Cuba through Field Experiments and Water Balance Simulation. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias versión On-line ISSN 2071-0054.
- Doorenbos J, Pruitt WO.** 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO. 144p. (Estudios FAO: Riego y Drenaje; 24).
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D.** 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. FAO. 530p. (Estudio FAO: riego y drenaje; 66).
- Fehr WR, Caviness CE.** 1977. "Stages of soybean development". Special Report 80. Iowa State University, Ames, Iowa. 11 pp.
- Giménez L.** 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? En: Seminario internacional (2º, 2012, Salto, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. INIA. 33-41.
- Giménez L, García M.** 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrociencia. 15(2): 100-108.

- Giménez L.** 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. En: Seminario internacional (1°, 2010, Paysandú, Uruguay). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. INIA. 29-37.
- Kantolic AG, Giménez, de la Fuente EB.** 2003. "Periodo crítico para la definición del rendimiento". En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, de la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. Facultad de Agronomía. 189-192 pp.
- Liu Y, Teixeira JL, Zhang HJ, Pereira LS.** 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 36, 233–246.
- Mambrin M, Bast R, Currié H, Debortoli D, Méndez M.** 2005. Evaluación del rendimiento de soja bajo riego en dos modalidades y secano. Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ciencias Agrarias. 4 p.
- Pereira LS, de Juan JA, Picornell MA, Tarjuelo JM.** 2010. El Riego y sus Tecnologías. (En Línea) Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete. Consultado 4 enero 2015. Disponible en: <http://crea.uclm.es/crea2/sp/index.php>
- Pereira LS, Teodoro PR, Rodrigues PN, Teixeira JL.** 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: Rossi G, Cancelliere A, Pereira LS, Oweis T, Shatanawi M, Zairi A. (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, pp. 161-180.
- Pereira LS, van den Broek BJ, Kabat P, Allen RG.** 1995. *Crop-Water Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, Wageningen.
- Popova Z, Pereira LS.** 2011. Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. *Agricultural Water Management*. 98: 675 – 683.
- Popova Z, Eneva S, Pereira LS.** 2006. Model validation, crop coefficients and yield response factors for irrigation scheduling based on long-term experiments. *Biosystems Engineering*. 95 (1): 139–149.
- Ritter A, Muñoz-Carpena R, Regalado C M.** 2010. Capacidad de la predicción de modelos aplicados a la ZNS: Herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol X: 259-264.
- Santos D.** 2009. Tolerancia al déficit hídrico, fijación biológica de nitrógeno y algunos mecanismos que los relacionan en soja. *Estación Experimental Agropecuaria Paraná*. 7 p.
- Sawchik J.** 2012. Necesidades de riego en cultivos y pasturas En: Seminario internacional (2°, 2012, Salto, Uruguay). Riego en cultivos y pasturas. INIA. 55-68.
- Sawchik J, Ceretta S.** 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. *Jornada Técnica de Cultivos de Verano. Serie de Actividades de Difusión*. INIA. 41-45 pp.
- Teixeira JL, Pereira LS.** 1992. ISAREG, an irrigation scheduling simulation model. *ICID Bull*. 41 (2): 29–48.

## ANEXO 2.

Precipitación diaria y riegos aplicados para cada tratamiento durante las dos temporadas evaluadas, 2011-12 y 2013-14

Año agrícola 2011-2012			Año agrícola 2013-2014			
Fecha	Precipitación	Riego T1	Fecha	Precipitación	Riego T1	Riego T4
30-nov	10		27-nov	50		
05-dic		18	02-dic	3		
10-dic		18	10-dic	9		
14-dic		36	13-dic		26	13
19-dic		36	19-dic		26	13
22-dic	48		21-dic		26	13
01-ene		54	26-dic	6	52	26
04-ene		36	27-dic		32*	
09-ene		54	28-dic	21		
17-ene		36	30-dic	21		
20-ene		36	02-ene	17		
21-ene	25		07-ene	18		
23-ene	20		09-ene		26	13
30-ene		36	10-ene	33		
31-ene	22		19-ene	24		
01-feb	7		21-ene	6		
05-feb	105		22-ene	69		
06-feb	84		24-ene	29		
07-feb	42		27-ene	11		
15-feb		36	28-ene	3		
20-feb	18		29-ene	1		
21-feb	2		30-ene	33		
28-feb	22		31-ene	21		
29-feb	88		01-feb	27		
01-mar	34		02-feb	21		
05-mar	5		03-feb	59		
06-mar	52		04-feb	10		
12-mar	21		06-feb	7		
13-mar	27		09-feb	6		
<b>Total</b>	<b>632</b>	<b>396</b>	10-feb	36		
			11-feb	8		
			19-feb	32		
			22-feb	100		
			25-feb	19		
			09-mar	12		
			14-mar	63		
			<b>Total</b>	<b>775</b>	<b>188</b>	<b>78</b>

\*\*Riego por error. Se contabilizo para el balance.

T5 secano. Sin riego suplementario

