

**UNIVERSIDAD DE LA  
REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP EN EL CULTIVO DE  
SOJA BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DE SUELO  
Y CULTIVAR**

**Por**

**Federico Gabriel PINTOS BAPTISTA**

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

Montevideo

URUGUAY

Mayo 2020

Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing. Agr. MSc Lucía Puppo, el Ing. Agr. MSc Pablo Morales, y el Ing. Agr. Ph.D. Andrés Quincke el 29 de mayo de 2020. Autor: Ing. Agr Federico Pintos. Director Ing. Agr. Dr. Claudio García.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia por el apoyo y paciencia durante el proceso de formación.

A Claudio García y Álvaro Otero por el apoyo brindado, confianza y tiempo que dedicaron a mi formación.

A INIA Salto Grande por permitir los recursos necesarios para que se llevara a cabo el experimento, a los integrantes del área fisiología y riego de INIA Salto Grande en especial a Delia Machado, Fernando Jorge, Fernando Malaquina, Wilson Cardozo, Analía Yaqués, Jonathan Alsogaray por la ayuda y compromiso en el experimento en campo y análisis de laboratorio.

A la dirección, docentes y funcionarios de la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía de Salto, por su solidaridad y disposición en la solución de imprevistos.

## TABLA DE CONTENIDOS

PÁGINA DE APROBACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
RESUMEN .....	VIII
SUMMARY.....	IX
1 <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1 <u>SITUACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS EN URUGUAY</u> .....	1
1.2 <u>EL CULTIVO DE SOJA EN URUGUAY</u> .....	2
1.3 <u>CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO DE SOJA</u> .....	3
1.3.1 <u>Grupos de madurez, crecimiento y desarrollo</u> .....	3
1.3.2 <u>Etapas fenológicas y período crítico del cultivo de soja</u> .....	4
1.3.3 <u>Manejo del cultivo</u> .....	5
1.3.4 <u>Rendimiento en granos</u> .....	6
1.3.4.1 <u>Factores que determinan la brecha en rendimiento</u> .....	6
1.4 <u>RÉGIMEN CLIMÁTICO DE URUGUAY</u> .....	8
1.4.1 <u>Régimen pluviométrico en Uruguay</u> .....	8
1.4.2 <u>Régimen de la demanda atmosférica</u> .....	8
1.4.3 <u>Capacidad de agua disponible de los suelos en Uruguay</u> .....	9
1.5 <u>GESTIÓN DEL AGUA</u> .....	10
1.5.1 <u>Gestión del agua a nivel país</u> .....	10
1.5.2 <u>Gestión del agua a nivel predial</u> .....	10
1.5.3 <u>Gestión del agua a nivel de cultivos</u> .....	11
1.6 <u>MODELO DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS</u> .....	11
1.6.1 <u>Aquacrop</u> .....	12
1.6.1.1 <u>Utilidad del modelo Aquacrop</u> .....	13
1.6.1.2 <u>Utilidad del modelo Aquacrop en el país</u> .....	14
1.6.2 <u>Descripción del modelo Aquacrop</u> .....	14
1.6.2.1 <u>Clima</u> .....	15
1.6.2.2 <u>Cultivo</u> .....	15
1.6.2.3 <u>Suelo</u> .....	18
1.6.2.4 <u>Manejo en riego y en campo</u> .....	18

1.6.2.5 Respuesta del cultivo al estrés .....	18
1.7 BALANCE HÍDRICO DEL SUELO .....	20
1.8 NECESIDADES DE AGUA PARA LOS CULTIVOS .....	21
1.8.1 <u>Necesidades de agua del cultivo de soja</u> .....	22
1.9 MANEJO DEL SUELO .....	23
1.9.1 <u>Recarga de agua del suelo</u> .....	24
1.9.2 <u>Capacidad de almacenaje de agua en el suelo</u> .....	25
1.9.3 <u>Compactación y ambiente edáfico</u> .....	26
1.9.3.1 Propiedades físicas que inciden en la respuesta vegetal ..	27
1.9.4 <u>Estrategias para revertir problemas de compactación</u> <u>en el suelo</u> .....	28
1.10 HIPÓTESIS DEL TRABAJO .....	29
1.11 OBJETIVOS .....	29
2 <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	30
2.1 UBICACIÓN DEL ENSAYO .....	30
2.2 DISEÑO DEL ENSAYO .....	30
2.3 MANEJO DE LOS TRATAMIENTOS Y DEL EXPERIMENTO .....	31
2.3.1 <u>Manejo del suelo</u> .....	31
2.3.2 <u>Siembra del cultivo de soja</u> .....	32
2.3.3 <u>Manejo de plagas y enfermedades durante el cultivo</u> .....	33
2.3.4 <u>Aplicaciones de riego</u> .....	33
2.3.5 <u>Datos climáticos</u> .....	34
2.4 EVALUACIONES .....	35
2.4.1 <u>Contenido de carbono orgánico lábil del suelo</u> .....	35
2.4.2 <u>Resistencia a la penetración del suelo</u> .....	35
2.4.3 <u>Densidad aparente del suelo</u> .....	36
2.4.4 <u>Evolución de la fenología</u> .....	36
2.4.5 <u>Evolución de la cobertura del cultivo de soja</u> .....	36
2.4.6 <u>Evolución de la biomasa del cultivo y determinación del</u> <u>área foliar</u> .....	37
2.4.7 <u>Distribución del sistema radicular</u> .....	37
2.4.8 <u>Cosecha y componentes del rendimiento</u> .....	38
2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	38
2.5.1 <u>Modelo estadístico</u> : .....	40

2.6	MODELO ACUACROP .....	41
2.6.1	<u>Identificación de los parámetros más relevantes para la calibración</u> .....	41
2.6.2	<u>Calibración de los parámetros</u> .....	42
2.6.3	<u>Uso de los parámetros calibrados para representar las diferentes situaciones evaluadas en el ensayo</u> .....	43
2.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	43
3	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	44
3.1	CONDICIONES CLIMÁTICAS .....	44
3.2	BALANCE HÍDRICO .....	44
3.3	RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACIÓN .....	45
3.4	DENSIDAD APARENTE DEL SUELO .....	48
3.5	CARBONO LÁBIL DEL SUELO AL FINAL DEL CULTIVO .....	49
3.6	DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICULAR EN SOJA .....	50
3.6.1	<u>Distribución radicular según manejo de suelo</u> .....	50
3.6.2	<u>Distribución radicular en riego y secano</u> .....	52
3.7	EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO .....	53
3.8	VARIABLES EN EL CULTIVO .....	55
3.8.1	<u>Fenología</u> .....	55
3.8.2	<u>Relación entre cobertura verde del cultivo y IAF</u> .....	56
3.8.3	<u>Cobertura del cultivo bajo riego y secano</u> .....	58
3.8.4	<u>Cobertura del cultivo según manejo de suelo</u> .....	59
3.8.5	<u>Cobertura del cultivo según cultivar</u> .....	61
3.8.6	<u>Biomasa vegetal en el cultivo con y sin riego</u> .....	62
3.8.7	<u>Biomasa vegetal en el cultivo según el manejo de suelo</u> .....	63
3.8.8	<u>Biomasa vegetal en el cultivo según el cultivar</u> .....	64
3.8.9	<u>Rendimiento en granos y componentes del rendimiento</u> .....	65
3.9	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	68
3.9.1	<u>Parámetros calibrados para el cultivo de soja</u> .....	68
3.9.2	<u>Cobertura de la canopia, Biomasa aérea y Rendimiento en granos para el escenario de riego y secano</u> .....	70
3.9.3	<u>Simulación del contenido de agua del suelo con y sin riego</u> .....	73
3.9.4	<u>Pruebas de Bondad de ajuste del modelo con y sin riego</u> .....	74
3.10	DESEMPEÑO DEL MODELO SEGÚN MANEJO DE SUELO .....	76

3.10.1	<u>Parámetros iniciales: Cobertura de la canopia, Biomasa aérea y Rendimiento en granos en el cultivo según manejo</u>	76
3.10.2.	<u>Simulación del Contenido de agua del suelo según manejo con y sin riego</u>	78
3.10.3	<u>Pruebas de desempeño del modelo según manejo del Suelo</u>	80
3.11	<u>DESEMPEÑO DEL MODELO SEGÚN CULTIVAR</u>	81
3.11.1	<u>Resultados observados y simulados en el cultivo según cultivar</u>	81
3.11.2	<u>Desempeño del modelo según cultivar</u>	84
4	<u>CONCLUSIÓN</u>	86
5	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	88
6	<u>ANEXOS: CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP EN EL CULTIVO DE SOJA BAJO DIFERENTES DE MANEJOS DE SUELO Y CULTIVARES</u>	99

## RESUMEN

El cultivo de soja en Uruguay tuvo un crecimiento en el área sembrada, de 12000 ha en el año 2000 a 1300000 ha en 2013. El rendimiento comercial osciló alrededor de 2000 kg ha<sup>-1</sup> dependiendo de la oferta climática en cada zafra. A nivel experimental, los rendimientos potenciales en distintos sitios del país superan los 5000 kg ha<sup>-1</sup>. Una de las principales razones que explican la brecha en producción en el cultivo de soja es el déficit hídrico en el período estival. Aquacrop es un modelo desarrollado por FAO que permite estimar el desempeño del riego en un cultivo en diferentes escenarios de disponibilidad de agua y variaciones en temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. El objetivo de este trabajo, fue calibrar el modelo Aquacrop y evaluar el comportamiento de diferentes cultivares frente a variaciones de manejo de suelo previo a la siembra. Con este propósito, se diseñó un experimento en la Estación Experimental Facultad de Agronomía Salto, ubicada en el km 21,5 de la ruta 31. El sitio seleccionado se encuentra sobre un suelo Brunosol Éutrico (Itapebí - Tres Árboles). Se establecieron tres manejos previos a la siembra del cultivo con el fin de incidir en el rendimiento del cultivo, debido a una posible diferencia en la exploración radicular y una mejora del almacenamiento de agua en la profundidad radicular; en combinación con diferentes cultivares y el riego; de tal forma de poder evaluar si el modelo es lo suficientemente sensible como para detectar estas diferencias, en suelo y entre los cultivares. El diseño experimental fue de parcelas subdivididas. Los resultados se analizaron con el software InfoStat. El desempeño del modelo se evaluó basándose en los siguientes indicadores estadísticos: Cuadrado medio del error, Cuadrado Medio del error normalizado, Índice de concordancia (Willmott's), Eficiencia del modelo (Nash-Sutcliffe). Se alcanzó en general un buen ajuste del modelo. El modelo logró representar la situación en riego y seco, como también las diferencias entre cultivares pero no se logró representar satisfactoriamente las diferencias en el manejo previo del suelo.

**Palabras clave:** riego, soja, suelo, Aquacrop.

# **CALIBRATION OF THE AQUACROP MODEL FOR SOYBEAN UNDER DIFFERENT SOIL AND MANAGEMENT SYSTEMS AND CULTIVARS**

## **SUMMARY**

The commercial soybean planting area in Uruguay had an increase from 12000 ha in 2000 to 1300000 ha in 2013. Average commercial yield is near 2000 kg ha<sup>-1</sup> according to the climate in each harvest season. Experimental trials in different parts of the country exceed 5000 kg ha<sup>-1</sup>. One of the main reasons that explains the yield gaps in soybean is the soil water deficit during summer. Aquacrop is a model developed by FAO that allows estimating crop irrigation performance in different scenarios of water availability, and air temperature and CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. The purpose of this study is to calibrate the growth model Aquacrop and evaluate the behavior of different soybean cultivars, against different soil management before sowing. Additionally, the model performance to discriminate between soil management and cultivars is discussed. The experiment was carried out at the experimental station of Facultad de Agronomía of Salto, located in Route 31, km 21.5. The soil of the selected site is Brunosol Eutricto (Itapebí-Tres Árboles). Three soil managements were implemented before sowing the crop, in order to influence crop yield, allowing changes in root exploration and increments in soil water storage at the root level, in combination with different cultivars and irrigation. The experiment was conducted in subdivided plots design. The results were analyzed with the InfoStat software. The model performance was evaluated based on the following statistical indicators: Mean square of the error, Mean square of the normalized error, Concordance index (Willmott's), Efficiency of the model (Nash-Sutcliffe). In general, a good fit of the model was achieved in discriminate differences between cultivars and irrigation; but failed to satisfactorily represent the differences in previous soil management. The calibrated cultivar NA6448 satisfactorily fitted under irrigation and rainfed.

**Keywords:** irrigation, soybean, soil, Aquacrop.

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 SITUACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS EN URUGUAY

A partir del año 2001 la agricultura en Uruguay y en la región ha tenido un importante crecimiento del área sembrada. En Uruguay, el área sembrada se incrementó de 400000 hectáreas en el año 2000 a 1500000 en 2015 (MGAP/DIEA 2016). Dicho incremento fue consecuencia del aumento del precio internacional de los granos; de una coyuntura impositiva favorable de Uruguay en comparación con Argentina, que inició un proceso inversor desde ese país; y a innovaciones tecnológicas en los sistemas productivos (Blum et al., 2008). Esta expansión agrícola en Uruguay respondió con el aumento de cultivos de verano específicamente a la soja (Arbeletche y Gutiérrez, 2010).

Es posible que se desarrollen en Uruguay sin la necesidad del riego la mayoría de los rubros agropecuarios, en especial la agricultura extensiva, debido a su régimen climático. La enorme variabilidad de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, y en general, la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos agrícolas, provoca que los cultivos extensivos de verano y en especial el cultivo de soja, afronten períodos secos que en ocasiones, comprometen los rendimientos obtenidos (Sawchik, 2006). El rendimiento anual del cultivo de soja de Uruguay se asocia, en un alto porcentaje, a las condiciones climáticas que enfrentan los cultivos en cada zafra; en las últimas ocho zafras el rendimiento promedio nacional osciló entre los 2000 y 2500 kg ha<sup>-1</sup> (MGAP/DIEA 2016), coincidiendo los rendimientos más bajos con años de menor ocurrencia de precipitación durante el período crítico del cultivo. La disponibilidad de agua es la responsable principal de la falta de estabilidad productiva y de la brecha entre los rendimientos potenciales y los obtenidos a nivel comercial (Giménez, 2014).

Según la última encuesta elaborada por MGAP/DIEA (2016), para la zafra 2015/16 la superficie regada en Uruguay de soja fue de 7910 ha<sup>-1</sup> (0,7

% del total sembrado), el rendimiento promedio con riego fue de 2828 kg ha<sup>-1</sup>, que representó un 46 % por encima del rendimiento promedio sin riego.

Es necesario que podamos profundizar sobre el conocimiento de la respuesta de los cultivares de soja y otros cultivos de verano al riego, y así poder diseñar y evaluar estrategias de riego suplementario en el cultivo a la hora de tomar decisiones sobre la inversión en tecnologías de riego, dentro de los sistemas productivos uruguayos. En este sentido, además de la experimentación agrícola es importante disponer de herramientas de simulación que permitan planificar estrategias de manejo del agua en diferentes escenarios económicos (Giménez, 2014).

## 1.2 EL CULTIVO DE SOJA EN URUGUAY

La soja es el principal cultivo agrícola en Uruguay, en 2015 el área sembrada alcanzó las 1300000 ha<sup>-1</sup> y en la actualidad se producen alrededor de 3 millones de toneladas de grano en el país, exportando casi la totalidad de la producción, dónde el mayor destino es China (MGAP/DIEA 2016). El aumento del área cultivada luego del año 2001 provocó el desplazamiento de rubros como la ganadería e hizo que la agricultura se expandiera colonizando nuevas zonas del país, fuera de la frontera agrícola tradicional donde se encuentran los mejores suelos para el desarrollo de la misma (Carriquiry, 2015).

El riego aparece como una alternativa para el aumento del rendimiento (cultivos, pasturas) y mejora de la estabilidad en la producción entre años. En las zonas noroeste del país por condiciones edáficas diferentes a la zona agrícola tradicional cobra mayor importancia esta tecnología. Levantando esta limitante hídrica y con uso de cultivares adaptados, se pueden lograr rendimientos en grano superiores a 4000 kg ha<sup>-1</sup> en situaciones comerciales (Otero et al., 2017).

### 1.3 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO DE SOJA

#### 1.3.1 Grupos de madurez, crecimiento y desarrollo

El ciclo de la soja puede variar de 70 a 140 días, dependiendo de la variedad y de la estación de año. La necesidad de determinar un intervalo de tiempo particular en las rotaciones de cultivos impulsó a que las variedades de soja se clasificaran en grupos de acuerdo a duración del ciclo. Actualmente los cultivares de soja se clasifican en grupos de madurez (GM) que van del 000 al X (Baigorri et al., 2009).

Los cultivares mejor adaptados a las condiciones agroecológicas de Uruguay son los que pertenecen a los GM V, VI y VII, que han presentado mayor rendimiento y estabilidad a lo largo de diferentes pruebas de evaluación (Ceretta y Vilaró, 2002).

La soja puede presentar hábito de crecimiento determinado o indeterminado. Los cultivares indeterminados son aquellos que continúan produciendo hojas nuevas, flores y vainas por varias semanas luego de la aparición de la primera flor. Estos cultivares alcanzan alrededor de un metro de altura. Los cultivares determinados finalizan su crecimiento en altura y producen las primeras flores casi al mismo tiempo, y generalmente presentan menor altura (0,6 m). En estos últimos, la máxima cobertura del dosel la logran en las etapas reproductivas tempranas (entre R1 y R3), mientras que el dosel de tipo indeterminado puede continuar creciendo después de este punto. También existen cultivares semideterminados que poseen características intermedias a las descritas por Baigorri et al. (2009). La planta de soja tiene la capacidad de producir mucho más flores de la que podrá mantener en etapas posteriores a la floración, entre el 40% y 80% de flores y frutos abortan (Nakayama, 1980).

La formación de las vainas tiene un período de crecimiento de dos semanas en adelante y el período es más largo en las variedades

indeterminadas. Cuando las condiciones no son limitantes, una vaina produce de tres a cuatro semillas, las cuales se llenan en aproximadamente 30 días (Baigorri et al., 2009).

La planta de la soja posee un sistema radicular pivotante, la profundidad máxima de las raíces es de aproximadamente de 1,3 a 1,8 m y puede alcanzar hasta 2,4 m, dependiendo de la cantidad de agua disponible, el tipo de suelo, la temperatura y la duración del ciclo biológico de la variedad. Alcanza su máxima profundidad antes del comienzo del llenado de granos (Andriani et al., 1997). La mayoría de las raíces se encuentran en los 0,3 m superiores del suelo, pero los períodos prolongados de sequía ocasionan que las raíces proliferen en mayor grado hacia capas del suelo más profundas. El estrés hídrico aumenta la relación entre raíces y tallos, y tiende a incrementar la longitud total de las raíces (Kanemasu, citado por Raes et al., 2012).

### 1.3.2 Etapas fenológicas y período crítico del cultivo de soja

La escala desarrollada por Fehr y Caviness (1971), una de las más utilizadas para la descripción de los estadios fenológicos del cultivo de soja, y contempla las etapas de desarrollo vegetativo y reproductivo. Dentro de las etapas vegetativas identifica la emergencia, cuando la plántula apenas se hace visible (VE), cuando los cotiledones están totalmente desplegados (VC); y los estadios corresponden a V1, V2, V3, V4, Vn. V1 se define cuando la primera hoja trifoliolada está totalmente desplegada en el tallo principal. Los siguientes estadios vegetativos hacen mención al número de nudos que tiene la planta en el tallo principal. Los estadios reproductivos comienzan cuando se hace visible la primera flor en cualquier nudo de tallo principal (R1), la floración completa se da en R2. El inicio de formación de vainas corresponde a R3 y continúa con el crecimiento en R4. En R5 corresponde con el llenado de grano hasta R6, estadio donde culmina el llenado del grano y comienza la etapa de maduración. En R7 y R8 el cultivo ya alcanzó la

madurez completa y solo depende del descenso de humedad en el grano, para permitir la cosecha.

Según Kantolic (2008) en el estado fenológico de R4 comienza el período crítico y finaliza en R5. Cualquier deficiencia hídrica, nutrientes, luz, defoliación por orugas, enfermedades foliares, ataque de chinches, durante esta etapa repercutirá directamente en el rendimiento en granos. Durante el período crítico ya ha finalizado la floración; las vainas y semillas más jóvenes son más propensas a abortar en condiciones de estrés hídrico. La reducción del rendimiento se debe principalmente a la caída en el número de vainas por planta. Si las condiciones son favorables para el cultivo luego de R5, el peso de los granos puede compensar en parte la caída del rendimiento ocurrida durante el período crítico. Esta compensación está limitada genéticamente. El ritmo de envejecimiento de la planta entre R1 y R5, influirá directamente en la capacidad del cultivo de compensar cualquier situación de estrés (Andriani, 1991).

### 1.3.3 Manejo del cultivo

Giorda y Baigorri (1997) definen la fecha de siembra óptima para un cultivar de forma de ubicar el período crítico del cultivo, en el momento de menor probabilidad de ocurrencia de estrés hídrico cuando no se dispone de riego. Es importante asegurar un buen crecimiento evitando el vuelco y condiciones predisponentes para la ocurrencia de enfermedades al final del ciclo. La siembra debe efectuarse en el momento preciso para que los grupos de madurez satisfagan sus requerimientos térmicos y de fotoperiodo logrando obtener buenos rendimientos (Mandl, 1994).

En Uruguay la fecha de siembra en donde se obtienen los mejores rendimientos en condiciones de secano es a mediados de octubre a fines de noviembre (Mandl, 1994).

La densidad de siembra promedio en Uruguay es de 360000 plantas ha<sup>-1</sup> (Fassio et al., 2016). En estudios recientes, Gaso (2018) concluye que para la obtención de altos rendimientos se debe superar las 300000 plantas

ha<sup>-1</sup>. La distancia entre hilera es alrededor de 0,4 m en la mayoría de los casos.

#### 1.3.4 Rendimiento en granos

El promedio mundial de rendimiento se encuentra entre 2,0 a 2,5 ton ha<sup>-1</sup> (con 13-14 % de humedad de las semillas), existe una gran brecha entre los rendimientos obtenidos por agricultores y el rendimiento alcanzable en la experimentación. Los rendimientos promedio de soja en Estados Unidos se acercan a 3,5 ton ha<sup>-1</sup>, en Brasil y Argentina son de alrededor de 3 ton ha<sup>-1</sup> (FAO, 2016).

En Uruguay, el rendimiento promedio nacional luego del año 2001 hasta la zafra 2017 osciló en torno a 2000 kg ha<sup>-1</sup> (MGAP/DIEA 2017), dependiendo del régimen climático del año (neutro, niña o niño). Los rendimientos promedios más bajos en el país coinciden con los años neutro y niña (Montoya y Otero, 2019).

Existen evidencias a nivel experimental de rendimientos potenciales hasta tres veces superiores a los citados anteriormente: 7000 kg ha<sup>-1</sup> (Giménez, 2014), 6000 kg ha<sup>-1</sup> (Fassio et al., 2016).

##### 1.3.4.1 Factores que determinan la brecha en rendimiento

Se entiende como rendimiento potencial al rendimiento de un genotipo adaptado, el cual es cultivado en condiciones favorables sin limitaciones de agua, nutrientes, plagas, ni enfermedades (Evans, citado por Salvagiotti, 2016).

Los factores que definen el rendimiento potencial en un sitio son el CO<sub>2</sub>, radiación, temperatura y genotipo. Estos factores establecen el techo de producción. El agua y nutrientes son considerados factores limitantes que pueden limitar el rendimiento según la disponibilidad. Las malezas, plagas, enfermedades y contaminantes pertenecen a factores reductores. Estos reducen el rendimiento según el manejo que se realice de ellos durante el ciclo del cultivo.

Las variaciones en el rendimiento de soja son consecuencia de efectos del genotipo, ambiente y de su interacción, siendo el efecto ambiental el que explica la mayor parte de la variabilidad del rendimiento. Las propiedades del suelo (físicas y químicas) en interacción con las variables meteorológicas (radiación, precipitación y régimen térmico) determinan diferentes ambientes para el cultivo de soja (Ovando et al., 2017). El rendimiento obtenido será la resultante de la combinación del manejo de factores limitantes en producción (agua y nutrientes) y factores reductores del rendimiento (malezas, plagas, enfermedades) (Salvagiotti et al., 2016).

Los cultivos agrícolas presentan un conjunto de limitantes para lograr rendimientos potenciales. Las deficiencias hídricas, especialmente en cultivos de verano realizados en secano, se destacan como el factor principal en causar pérdidas importantes en el rendimiento (Terra et al., 2013).

La radiación solar interceptada por la planta es la fuerza que impulsa la transpiración y la fotosíntesis del cultivo (Allen et al., 2006). Por tanto, existe una relación directa entre la producción de biomasa y el agua consumida a través de la transpiración. El estrés hídrico y la disminución de la transpiración tienen como resultado una reducción en la producción de biomasa, lo cual generalmente también reduce el rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979).

En Uruguay hay reportes a nivel experimental y comercial de diferencias de alrededor de 50% del rendimiento en cultivos de soja con deficiencias hídricas en relación al cultivo regado (Giménez et al., 2014, Fassio et al., 2016, MGAP/DIEA 2016).

En orden de importancia al momento de determinar el rendimiento en soja, la disponibilidad de agua aparece como el efecto más importante, en segundo lugar el número de plantas cosechadas y en tercer lugar el GM y/o el cultivar, aunque este último aspecto cobraría importancia como medida de manejo sólo si hubiera disponibilidad suficiente de agua (Fassio et al., 2016).

Según Giménez (2014) la respuesta al riego suplementario puede variar entre años a consecuencia de las condiciones meteorológicas de la zafra (radiación, temperatura, precipitaciones), y de la magnitud y duración del déficit hídrico.

#### 1.4 RÉGIMEN CLIMÁTICO DE URUGUAY

El Uruguay está situado entre los 30 y 35 grados de latitud sur, en una zona subtropical templada. Las temperaturas medias del aire más altas se presentan en los meses de enero y febrero y las más bajas en junio y julio. De mayo a octubre es posible que se den las condiciones para que ocurran heladas agrometeorológicas. El período libre de heladas en nuestro país es de aproximadamente 180 días (Castaño et al., 2011).

##### 1.4.1 Régimen pluviométrico en Uruguay

El valor medio de la precipitación acumulada anual sobre el país se sitúa entre 1200 y 1600 mm, con los menores valores situados al suroeste (Colonia) y los máximos al noreste (Rivera y Artigas) (Castaño et al., 2011).

Si bien no tenemos un régimen de precipitaciones bien marcado por una estacionalidad, como en otras regiones del mundo, podemos decir que las precipitaciones aumentan en los meses de otoño y primavera y se hacen mínimas en los meses de invierno y verano, salvo en el sureste del país donde esto no ocurre. Los valores mensuales de precipitación registrados en un año particular, se pueden apartar considerablemente del promedio mensual histórico debido a la gran variabilidad interanual (Castaño et al., 2011).

##### 1.4.2 Régimen de la demanda atmosférica

La variabilidad interanual de algunas variables climáticas (temperatura del aire, radiación, viento y humedad relativa) utilizadas para estimar la evapotranspiración por el método Penman-Monteith es relativamente baja, en comparación con la variabilidad que existe en las precipitaciones. Los valores de evapotranspiración calculados por el método Penman-Monteith

no presentan una gran variabilidad entre años para el mismo mes (Otero et al., 2017). El valor medio de la evapotranspiración acumulada anual, estimada por el método de Penman-Monteith, se sitúa entre 1000 y 1200 mm, con los menores valores situados al sureste y los máximos al noroeste del país (Castaño et al., 2011).

La evapotranspiración presenta un claro comportamiento estacional, registrándose los valores más altos durante el verano, alcanzando alrededor de 160-185 mm mensuales y los mínimos en los meses de invierno con 25-35 mm mensuales (Castaño et al., 2011).

Si comparamos la oferta anual (precipitaciones 1600 mm) con la demanda (evapotranspiración 1200 mm) sería razonable pensar que no tendríamos períodos durante el año con escasez de agua ni mucho menos la necesidad de regar cultivos extensivos o pasturas. La necesidad de riego es consecuencia de la elevada demanda atmosférica en los meses de verano (diciembre, enero, febrero), la alta variabilidad de las precipitaciones y la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos.

#### 1.4.3 Capacidad de agua disponible de los suelos en Uruguay

La capacidad de agua potencialmente disponible de los suelos agrícolas del país se encuentra entre los 80 y 160 mm en todo su perfil (Molfino y Califra, 2001). Estos autores consideraron algunos supuestos en los suelos para la estimación del agua disponible: a) la constitución de los perfiles de suelos agrícolas es esencialmente arcilla, limo y arena fina (menor a 2 mm) en un cien por ciento, b) carecen de rocosidad (afloramientos rocosos), pedregosidad, c) no están afectados por erosión ni degradación, d) no presentan limitaciones químicas severas que afecten el crecimiento y desarrollo radicular. Es de esperar que el agua disponible real para los cultivos sea considerablemente menor a la estimada por Molfino y Califra (2001) debido a restricciones en el crecimiento en profundidad de las raíces de la soja en campos agrícolas.

## 1.5 GESTIÓN DEL AGUA

### 1.5.1 Gestión del agua a nivel país

En Uruguay existen aproximadamente 205000 ha<sup>-1</sup> bajo riego, 180000 ha<sup>-1</sup> corresponden al cultivo de arroz, 18000 ha<sup>-1</sup> al cultivo de maíz y soja y 7000 ha<sup>-1</sup> a cultivos intensivos, principalmente el cultivo de cítricos y papa (MGAP/DIEA 2016).

Actualmente el país no tiene posibilidad de expansión de riego en cultivos extensivos debido a que los acuíferos, no permiten extracción de caudales suficientes y los permisos otorgados para extracción en ríos y arroyos se encuentran colmados.

El desarrollo e intensificación del riego deberá basarse en la construcción de reservas de agua, aprovechando el agua precipitada (Hill, 2016). Aproximadamente el 40 % de lo que llueve en nuestro país escurre por la superficie. Se estima que el volumen (3.6 km<sup>3</sup>) de agua utilizado en la actualidad para regar, representa solo el 5% del agua que escurre anualmente (Hill, 2016).

Hasta el momento el desarrollo del riego en Uruguay se dio a partir de fuentes artificiales mediante represamiento individual. La opción de proyectos de embalses multiprediales parece ser la propuesta que mejor optimiza los recursos y no excluye a productores de tener la posibilidad de acceder al agua para riego (Hill, 2016).

### 1.5.2 Gestión del agua a nivel predial

Los sistemas productivos agrícola ganaderos de Uruguay, se caracterizan por presentar rotación de cultivo y pasturas. Disponer de herramientas para la toma de decisiones que permitan priorizar el uso del agua entre cultivos y pasturas en predios que disponen del riego, conducirá a una mejor gestión del recurso. El modelo Aquacrop (Hsiao et al., 2009), es una buena opción de apoyo para la toma de decisión, ya que permite evaluar

el desempeño de los cultivos regados contemplando el clima, cultivo, suelo y manejo.

### 1.5.3 Gestión del agua a nivel de cultivos

En nuestro país a diferencia de otras regiones del mundo, el riego en cultivos y pasturas no sería necesario si no fuese por el déficit hídrico temporario y de intensidad variable que ocurre en verano principalmente, comprometiendo considerablemente la producción (Otero et al., 2017).

El riego suplementario es una opción para poder aprovechar la lluvia en base a la programación del riego; a través de balances ajustados del agua en el suelo. Esta técnica se adapta muy bien para Uruguay en cultivos como soja bajo riego, permitiendo capitalizar el agua de lluvia, reducir costos de bombeo, mejorar la eficiencia del agua aplicada (Otero et al., 2017).

El uso del modelo Aquacrop permite generar estrategias de uso y manejo del agua en cultivos agrícolas de verano, conocer la respuesta de éstos frente a diferentes disponibilidades hídricas.

## 1.6 MODELO DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS

Los modelos son representaciones simplificadas de un objeto o un sistema, y son elaborados con el fin de identificar brechas en conocimientos o en datos, para entender el comportamiento de los sistemas y predecir estados a futuro (López et al., 2011). Un modelo de cultivos logra representar de forma sencilla y sintética los procesos fisiológicos más importantes que gobiernan el crecimiento. Los modelos de cultivos han tenido un considerable avance en los últimos 45 años, como resultado del desarrollo en la computación y del conocimiento científico del sistema suelo-planta-atmósfera (Bootte et al., citado por Montoya, 2013). La mejor comprensión de la interacción y evolución de los principales factores involucrados en los modelos, es adquirida comparando resultados de la simulación con observaciones experimentales.

En el mundo se han desarrollado diferentes tipos de modelos agrícolas para distintos propósitos, entre ellos los modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de cultivos. Algunos ejemplos son: el modelo Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) (Jones et al., 2003), Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) (Keating et al., 2003), CropSyst (Stockle et al., 2003) y Crop Water Productivity Model (Aquacrop) (Steduto et al., 2009). Los mismos se diferencian según el propósito para lo cual fueron creados, poseen diferencias en la escala que trabajan (tiempo y superficie), así como también hacia dónde se orienta el interés del modelador. Los modelos son herramientas que nos permiten obtener mucha información y para que la información adquiera valor, estas herramientas deben estar calibradas y validadas para las regiones geográficas y escenarios que queremos simular. La calidad de los datos que debemos proporcionarles a los modelos debe ser confiable, para poder realizar buenas estimaciones (Ovando et al., 2016).

Muchos modelos de cultivos simulan el desarrollo y rendimiento de los cultivos y permiten estimar su crecimiento ante la aplicación de nuevas tecnologías o condiciones de manejo.

#### 1.6.1 Aquacrop

Aquacrop es un modelo desarrollado por FAO que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos herbáceos en función del consumo de agua en diferentes escenarios de disponibilidad hídrica. Permite evaluar el impacto del medio ambiente y el manejo de los cultivos sobre la producción (Steduto et al., 2009).

El modelo Aquacrop una alternativa válida para simular los procesos de formación del rendimiento y crecimiento del cultivos herbáceos, bajo diversas condiciones de fertilidad de suelo, clima y disponibilidad de agua (Raes et al. 2012). Es un modelo que fue calibrado y validado en diferentes regiones del mundo para diferentes cultivos. En el cultivo de soja hay trabajos realizados en Uruguay por Montoya et al. (2017) y por Giménez et

al. (2017), en Líbano por Abi Saab et al., (2014) y en Argentina por Morla y Giayetto (2012). En el cultivo de maíz se pueden citar los trabajos en Argentina realizados por Morla y Giayetto (2012) y De la Casa, (2011) y en España por Hsiao et al., (2009).

Los principales datos de salida de Aquacrop son el rendimiento y el uso del agua (evaporación y transpiración) de un cultivo que crece en un lugar específico, con un determinado clima, suelo y suministro de agua (Steduto et al., 2009).

#### 1.6.1.1 Utilidad del modelo Aquacrop

El uso de este modelo es muy variado y se puede ajustar según el interés del usuario. Por ejemplo, las predicciones de rendimiento pueden ser útiles para los agricultores, ingenieros, economistas, políticos y científicos. Los resultados de las simulaciones de AQUACROP también pueden ser datos de entrada para otros tipos de herramientas y modelos (Steduto et al., 2009), como ser el manejo del agua en cuencas. Sus principales usos han sido:

- Comprender respuestas de los cultivos al cambio ambiental. Estudiando el efecto del cambio climático en la producción de cultivos por ejemplo operando el modelo en condiciones de CO<sub>2</sub>, temperatura y precipitaciones en condiciones históricas o futuras.
- Comparar los rendimientos reales con la producción potencial.
- Identificar las restricciones en la producción de cultivos y en la productividad del agua.
- Desarrollar programas de riego para mejorar el uso y la eficiencia del recurso durante la temporada y ante escenarios climáticos desfavorables.
- Desarrollar estrategias en condiciones de déficit hídrico para maximizar la productividad del agua, mediante el ajuste en

prácticas de manejo, fecha de siembra, selección de cultivares y fertilización.

#### 1.6.1.2 Utilidad del modelo Aquacrop en el país

En Uruguay, los cultivos y pasturas en verano afrontan períodos con déficit hídrico de distinta intensidad y duración ocasionando diferentes impactos en la producción. La disponibilidad de una herramienta que nos posibilita evaluar el impacto del déficit hídrico en los cultivos podría ser útil en:

- El desarrollo y optimización de calendarios de riego y decisiones sobre gestión del agua.
- La planificación y análisis de posibles escenarios en los cultivos.
- Definición de la fecha de siembra para los cultivo en sistemas en seco y riego.
- Evaluar el impacto de la escasez de agua en la producción de los cultivos.
- Comparar los resultados de varios planes de suministros hídricos.
- Evaluar la respuesta de cultivares al riego (grupo de madurez en soja).
- Mejorar la productividad y la eficiencia del recurso agua.

#### 1.6.2 Descripción del modelo Aquacrop

Aquacrop estima la producción en biomasa a través del agua transpirada diariamente a través de un parámetro de productividad (WP). Este parámetro representa la relación existente entre transpiración y producción de biomasa de un cultivo. A partir de la biomasa se obtiene el rendimiento como fracción de biomasa producida destinada a órganos cosechables, utilizando un índice de cosecha (Hi) del cultivo (Steduto et al., 2009).

Aquacrop utiliza la ecuación 1 para el cálculo de biomasa a través del agua transpirada y la ecuación 2 para la estimación del rendimiento.

$$(Ec\ 1) \quad B = WP * \sum Tr$$

B: biomasa acumulada producida ( $\text{kg m}^{-2}$ ). Tr: Transpiración del cultivo ( $\text{mm, m}^3$ , superficie) en el tiempo que se produce la biomasa. WP: parámetro de productividad del agua ( $\text{kg biomasa.m}^{-2}.\text{mm}^{-1}$ , o  $\text{kg biomasa.m}^{-3}$  agua transpirada).

$$(Ec\ 2) \quad Y = HI * B$$

Y: rendimiento cosechable ( $\text{kg m}^{-2}$ ). HI: índice de cosecha (porcentaje o fracción). B: biomasa acumulada producida ( $\text{kg m}^{-2}$ ).

El modelo focaliza el continuo suelo planta atmosfera y luego representa los principales procesos que inciden directa o indirectamente en el desempeño del cultivo. Dispone de diferentes componentes en donde se debe caracterizar el ambiente y el cultivo:

- Clima (régimen térmico, precipitaciones, demanda de evaporación y concentración  $\text{CO}_2$ ).
- Cultivo (desarrollo, crecimiento y rendimiento).
- Suelo (agua disponible, el manejo, prácticas que incluyen variantes en el riego, fertilización y mulching).

#### 1.6.2.1 Clima

El modelo caracteriza el clima con cuatro variables meteorológicas diarias: temperaturas máxima y mínima del aire, precipitación y evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), la cual se calcula de acuerdo a la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006). Además, requiere la concentración media anual de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera.

#### 1.6.2.2 Cultivo

Para la descripción del cultivo el modelo requiere información de la fenología, cobertura del dosel, profundidad de raíces, densidad de siembra y fecha de siembra.

Fenología: El modelo trabaja con grados día acumulados (GDD) (Mc Master y Wilhelm (1997), como el reloj interno predeterminado para tener en cuenta los efectos de los regímenes de temperatura en la fenología. En la simulación se puede elegir entre GDD o días del año. Para cultivos anuales es importante tener identificadas las principales etapas fenológicas (emergencia, inicio de la floración (antesis), iniciación acumulación de reserva en órganos (raíces, tubérculos, tallos), etapa en la que se alcanza la profundidad máxima de raíces, inicio de la senescencia del dosel y maduración fisiológica (Raes et al., 2012).

Desarrollo del canopia: La cobertura verde de un cultivo es importante para el cálculo de biomasa producida. La expansión, envejecimiento y senescencia de la canopia inciden en la conductancia de la canopia que es finalmente controlada por estomas. La cantidad de agua transpirada, determina la biomasa producida. El modelo trabaja con porcentaje de suelo cubierto por la canopia. Para la estimación del desarrollo de la canopia, Aquacrop utiliza dos ecuaciones que logran simular con éxito la evolución temporal del crecimiento de la canopia. Una ecuación representa el crecimiento de la canopia hasta aproximadamente el 50% de suelo cubierto y luego comienza a operar la otra hasta alcanzar la cobertura máxima (Raes et al., 2012).

Profundidad de raíces: la cantidad de agua absorbida por las raíces en el modelo se estima conociendo la profundidad efectiva de raíces y el patrón de extracción de agua. Utiliza una función exponencial para simular el crecimiento de las raíces en el cultivo. El modelo permite corregir el crecimiento radicular en presencia de factores restrictivos en el suelo.

El patrón de extracción de agua desde la superficie del suelo es ajustable al tipo de cultivo y condiciones del suelo tentativamente de 40 %, 30 %, 20 % y 10 % del agua requerida en toda la profundidad radicular, que suele aumentar a lo largo del crecimiento del cultivo. Se absorbe desde el cuarto superior al cuarto inferior, cuando el contenido de agua es adecuado.

Al igual que el crecimiento radicular, el patrón puede ser modificado por el usuario, en casos específicos justificados por las características físicas o químicas del suelo (Raes et al., 2012).

**Transpiración del cultivo:** la transpiración depende del porcentaje de cobertura de la canopia cuando la planta se encuentra en condiciones sin limitantes de agua en el suelo y puede ser incorporada como tal o a través del índice de área foliar. También utiliza la evapotranspiración de referencia FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) como medida de la demanda de referencia y el coeficiente de transpiración del cultivo obtenido del desarrollo de la cobertura vegetal.

**Evaporación del suelo:** Para el cálculo el modelo considera la evaporación directa del suelo en función de área que no está cubierta por el cultivo, también tiene en cuenta la humedad del suelo en la capa superficial. En la medida que el suelo se va secando utiliza una ecuación para el ajuste de disminución de la evaporación.

**Producción de biomasa:** El parámetro que relaciona la producción en biomasa con la transpiración del cultivo es la productividad del agua (WP). Cuando se normaliza para la demanda atmosférica y concentración de CO<sub>2</sub> permanece constante para un cultivo dado si los nutrientes minerales no son limitantes (Tanner y Sinclair, 1983; Hsiao y Bradford, 1983; Steduto et al., 2007). El valor único (conservativo) de WP, es empleado para todo el ciclo en la mayoría de los cultivos y no se modifica a priori con el estrés hídrico.

**Rendimiento:** El parámetro que relaciona la biomasa aérea total de un cultivo con el rendimiento cosechable (grano, fruto, tubérculo) es el índice de cosecha (HI). Aquacrop ajusta el desarrollo del órgano cosechable desde el cuajado en el caso de fruto o del grano y desde la iniciación de acumulación de reservas en el caso de tubérculos o raíces hasta maduración o cosecha. La curva de desarrollo que simula el crecimiento del órgano, posee diferentes formas en el caso de ser frutos u órganos de reserva.

### 1.6.2.3 Suelo

En la descripción de las características hidráulicas del suelo, el modelo permite incluir hasta cinco horizontes de profundidad variable. Para estimar el agua disponible y los movimientos de agua en el perfil, se requieren datos de la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, el punto de saturación y la conductividad hidráulica saturada. En el caso que se disponga de una capa freática se debe indicar la profundidad por debajo de la superficie del suelo que se ubica la misma y su salinidad.

Además de establecer un balance hídrico preciso en la zona radicular, también se puede obtener un equilibrio de sales en casos que exista capas freáticas con concentración salina o agua de riego con problemas de salinidad.

### 1.6.2.4 Manejo en riego y en campo

Brinda opciones de manejo de riego y manejo de campo. Para el caso de manejo del riego, Aquacrop brinda la posibilidad de simulación en condiciones de riego y seco. Además, posee opciones de manejo que van desde elección del método de aplicación de agua, umbrales de sensibilidad al estrés de los cultivos, calendarios de riego y láminas. También se puede realizar un ajuste de modo automático con criterios prefijados.

En el manejo de campo considera la fertilidad, cobertura de suelo y uso de canchales para estancar el agua o controlar la escorrentía superficial y mejorar la infiltración.

### 1.6.2.5 Respuesta del cultivo al estrés

La ocurrencia de algún tipo de estrés abiótico como el estrés hídrico, térmico, nutricional o químico (salinidad) -dependiendo de la intensidad y duración del mismo- repercuten directamente en la respuesta de la planta afectando su desempeño. Aquacrop permite cuantificar el impacto que los diferentes tipos de estrés tienen durante el ciclo del cultivo. Permite ajustar el crecimiento del cultivo a través de diferentes coeficientes de estrés cuando

las condiciones de crecimiento superan los rangos de tolerancia de la planta.

Estrés hídrico. Aquacrop diferencia dos tipos de estrés: por déficit y por exceso de agua, a este último lo define como estrés por aeración. El efecto del estrés hídrico en la productividad y los procesos de uso del agua afectan en el crecimiento de la canopia, la conductancia estomática, la senescencia de la canopia, la profundización de las raíces, y el índice de cosecha.

Déficit hídrico. El balance de agua del suelo permite conocer diariamente la disponibilidad de agua para la planta. Cuando el descenso de la reserva de agua en el suelo supera cierto umbral de agotamiento, comienza a operar los coeficiente de estrés; su incidencia aumenta en la medida que avanza el agotamiento de agua en el suelo.

La representación de la mayor o menor tolerancia al estrés por déficit hídrico del cultivo, se da a través del ajuste de curvas de respuesta del contenido de agua del suelo y su efecto en la planta. Los umbrales de estrés, así como la forma de la curva, se establecen por calibración y deberían estar basados en el conocimiento de la resistencia o la tolerancia del cultivo a la sequía (Steduto et al., 2009). El estado hídrico de una planta no solo depende del contenido de agua de un suelo, sino también de la tasa de transpiración determinada por la demanda atmosférica. Aquacrop corrige los umbrales de estrés hídrico según la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

La expansión foliar, senescencia y conductancia estomática son los procesos más afectados cuando ocurre estrés por déficit hídrico. La expansión foliar es la más sensible y es la que posee los umbrales críticos más altos, mientras que la senescencia y conductancia estomática empiezan a afectar la biomasa si continúa descendiendo el nivel de agua del suelo. Aquacrop también ajusta el crecimiento radicular en respuesta a la intensidad del estrés. Como es de esperar, los umbrales en los cuales el crecimiento de la raíz se ve perjudicado, son mucho más bajos que para la

expansión foliar. De esta manera, se ajusta la relación parte aérea: raíz frente a un estrés por falta de agua. El índice de cosecha (HI) también se ve afectado por el estrés hídrico. El modelo permite también ajustar este parámetro. El déficit puede causar aumento o disminución del índice de cosecha según el proceso afectado en el vegetal, momento y duración del estrés. La polinización y cuajado del fruto, el llenado insuficiente y el aborto de los frutos más jóvenes debido a la falta de asimilados fotosintéticos son procesos por los cuales se ajusta el índice de cosecha.

### 1.7 BALANCE HÍDRICO DEL SUELO

La cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda del cultivo en Uruguay, depende de la reserva de agua en el suelo al momento de la siembra, de las precipitaciones y del riego en cultivos que se disponga de la tecnología (Giménez 2014, Sawchik 2012).

La metodología del balance hídrico del suelo, permite realizar un uso eficiente del recurso agua disponible en un predio de producción, logrando estimar los mejores momentos de captación del agua de las precipitaciones en los suelos y disminuir costos de riego (Otero, 2016). Además proporciona datos necesarios para tomar decisiones de volumen de agua y momento del riego.

El método de balance hídrico del suelo es una metodología que permite simular la evolución del contenido hídrico del suelo y realizar un manejo del agua para un cultivo en determinadas condiciones (riego y precipitaciones). También, es usado como un método para la determinación de la evapotranspiración de un cultivo (Allen et al., 2006).

El balance hídrico consiste en evaluar el flujo de agua que entra y sale de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado período de tiempo y se representa con la siguiente ecuación:

$$(Ec\ 3) \quad ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

Donde: (R) riego, (P) precipitación, (ES) escurrimiento superficial, (D) percolación profunda, (C) recarga por capilaridad a la zona de las raíces desde una capa freática o un horizonte saturado,  $\Delta FS$  movimiento horizontal por flujo sub superficial hacia adentro y hacia afuera de la zona radicular, ( $\Delta SW$ ) variación del contenido de agua en el suelo en el intervalo de tiempo, (ET) evapotranspiración.

La evapotranspiración del cultivo comprende la cantidad total de agua que transpira el cultivo más la evaporación directa del agua de la superficie del suelo. Si se conoce el valor de todos componentes del balance hídrico en el suelo, se puede deducir la evapotranspiración (ET) a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo ( $\Delta SW$ ) a lo largo de un período de tiempo.

Existen hoy nuevas tecnologías que permiten medir el contenido de agua del suelo, en tiempo real y con diferentes sistemas de comunicación (Otero et al., 2017). Estos equipos permiten realizar mediciones continuas de la evolución del contenido hídrico de un suelo en toda una estación de crecimiento de un cultivo y obtener mediciones diarias del consumo del cultivo, y así poder tomar decisiones con mayor facilidad.

## 1.8 NECESIDADES DE AGUA PARA LOS CULTIVOS

El agua siempre ha sido el principal factor que limita la producción agrícola en gran parte del mundo, donde la precipitación no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos (Hsiao et al., 2012). Simultáneamente con la transpiración de la planta se da el intercambio de  $CO_2$  desde la atmósfera (asimilación de carbono) a la planta, para que luego éste pueda ser usado en la síntesis de carbohidratos a través del proceso de fotosíntesis. Existe una relación muy fuerte entre la transpiración de una planta y su producción en biomasa (Steduto et al., 2009).

La cantidad de agua que necesita un cultivo para desarrollarse y producir biomasa se puede estimar a través de la transpiración del cultivo.

La evapotranspiración del cultivo o evapotranspiración potencial ( $ET_c$ ) es la que posee un cultivo sin limitantes hídricas y la evapotranspiración real ( $ET_r$ ) es la cantidad de agua que evapotranspira un cultivo en las condiciones que se desarrolla, con posibles restricciones de agua en el suelo. En ambientes donde ocurren deficiencias de agua, la  $ET_r$  siempre es menor que la  $ET_c$ , y su relación (cociente) es usado como un índice del grado de déficit hídrico en que estuvo sometido el cultivo (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración del cultivo en milímetros de agua por unidad de tiempo ( $ET_c = \text{mm}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ) y varía en función de los siguientes factores:

- Climáticos (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, e intensidad de la radiación solar).
- Disponibilidad de agua en el suelo.
- Características del cultivo (tipo de cultivo, grado de cobertura y etapa fenológica del cultivo).
- Manejo del suelo y del riego.

La cantidad de agua que necesita un cultivo en su ciclo de vida es variable y dependerá de las condiciones ambientales. Para conocer la cantidad de agua que necesita el cultivo debemos conocer la demanda atmosférica (evapotranspiración de referencia  $ET_o$ ) y las características del cultivo ( $K_c$ ) (Allen et al., 2006).

#### 1.8.1 Necesidades de agua del cultivo de soja

Las necesidades hídricas de la soja en Uruguay varían entre 400 mm y 700 mm en todo el ciclo de cultivo (Otero et al 2017, Giménez y García 2011), dependiendo del año, del suelo, del cultivar (largo del ciclo, cobertura), de las prácticas de manejo y de la evapotranspiración. La máxima evapotranspiración diaria para soja es de aproximadamente 8-9 mm  $\text{día}^{-1}$ , que normalmente ocurre cuando se alcanza la cobertura máxima de la canopia, cerca de plena floración (R2) hasta el inicio del llenado de las vainas (R5) (Steduto et al., 2012).

En la zona núcleo sojera de Argentina la evapotranspiración varía de 500 a 650 mm, mientras que en EEUU los valores van de 330 a 825 mm para todo el ciclo (Giorda y Baigorri, 1997).

Giménez y García (2011), estimaron la  $ET_c$  (Evapotranspiración máxima del cultivo) y  $ET_r$  (Evapotranspiración real) en una serie de cultivos, utilizando el modelo (WinISAREG) para una serie de años (1984-2007), en dos localidades contrastantes de Uruguay (Salto y Colonia). El cultivo de soja obtuvo valores promedio máximos de  $ET_c$  de 650 y 550 mm por ciclo dependiendo del grupo de madurez simulado (IV y VI) y de la localidad. En Salto se obtuvieron valores por debajo de los estimados para Colonia. La evapotranspiración real ( $ET_r$ ) del cultivo fue menor a la  $ET_c$  en la mayoría de los años estudiados. El déficit hídrico para el cultivo de soja osciló entre 200 y 300 mm por ciclo dependiendo del año, del grupo de madurez y de la localidad. En trabajos con características similares realizados por Otero et al., (2017) para la zona de Salto con grupos de madurez (V, VI) encontraron resultados similares en la relación  $ET_r/ET_c$  para soja.

## 1.9 MANEJO DEL SUELO

Cuando no se dispone de riego las necesidades de agua del cultivo se satisfacen de la cantidad de agua que logran captar los suelos provenientes de las precipitaciones (precipitación efectiva), de la capacidad de almacenaje del suelo y de la exploración radicular (Sawchik y Ceretta 2005, Ernst 1999).

Debido a las características de la agricultura en Uruguay, frecuentemente se ocasiona restricciones físicas en el suelo asociadas a procesos degradativos, debido a la presencia de suelos de texturas pesadas, con baja capacidad de infiltración, clima húmedo con frecuente tráfico de maquinaria y animales (Ernst et al., 2019).

El deterioro de las propiedades físicas del suelo afecta negativamente la productividad de las plantas: a) reducción en la capacidad de exploración radicular; b) disminución del agua disponible para el cultivo a través de una

reducción en la infiltración del agua en el suelo; c) disminución del intercambio de gases, y del flujo de temperatura del suelo repercutiendo en la actividad microbiana (Martino, 1999).

Los cultivos de cobertura son imprescindibles en sistemas agrícolas con un cultivo por año, los cuales mantienen el suelo cubierto, ayudan en el control de la erosión, incorporan carbono al sistema y reciclan nutrientes (Ernst, 2004).

El aumento del carbono orgánico en el suelo mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo, mejorando el ambiente edáfico para el desarrollo de las plantas (Rucks et al., 2004).

Los cultivos de cobertura del suelo logran mejorar el balance de carbono a largo plazo, aumentan el agua disponible con el aumento de la infiltración, a través de la mejora de la estructura y aumento de la macroporosidad del suelo y reducen las pérdidas por evaporación al mantener el suelo cubierto luego del inicio del barbecho (Siri y Ernst, 2011).

#### 1.9.1 Recarga de agua del suelo

La infiltración mide la velocidad de ingreso del agua al perfil del suelo, y como es de esperar, tiene mucha relación con la recarga de agua del suelo proveniente de la precipitación o del riego. La tasa de infiltración es afectada por el contenido de agua en horizontes superficiales y de la cantidad de macroporos que posee el suelo (Artigas y García 2012, Parr y Bertrand 1960).

Como se mencionó anteriormente el cultivo de cobertura mejora la infiltración del agua en el suelo a través de la reducción de la velocidad de escurrimiento superficial y el aumento de la conductividad hidráulica a través de la mejora de la estructura del suelo. Por otro lado, la cobertura vegetal al reducir el impacto de la gota de lluvia al suelo, reduce el encostramiento, favoreciendo también la infiltración (Xin et al., 2019).

### 1.9.2 Capacidad de almacenaje de agua en el suelo

La cantidad de agua que puede almacenar un suelo depende de la profundidad del perfil y del volumen de agua que puede almacenar en cada horizonte. El agua que estará disponible para las plantas dependerá no solo del volumen de agua que pueda almacenar el suelo, sino también de la magnitud del sistema radicular de la planta, en extensión espacial y en densidad radicular. El volumen que puede almacenar un horizonte depende del espesor del mismo, de la textura (% arena, % limo, % arcilla) y de la materia orgánica. Dentro de un mismo suelo podrá almacenar más o menos agua según la densidad aparente de cada horizonte, y del deterioro de la estructura.

La disminución de la porosidad del suelo reducirá el volumen de agua que pueda almacenar. Suelos más estructurados y con mayor porosidad van a almacenar más agua que suelos con malas estructuras y menor porosidad. La textura responde los procesos de génesis del suelo y no se altera fácilmente debido a las acciones del hombre. En cambio, la estructura y la porosidad pueden ser alteradas como resultado de esquemas productivos (degradación de la materia orgánica) y o por tráfico con maquinaria pesada (Rucks et al., 2004).

La disponibilidad de agua en el suelo se refiere a la capacidad de un suelo de retener el agua disponible para las plantas. Para determinar el agua disponible de un suelo debemos conocer los parámetros hídricos o hidráulicos del suelo: curva de retención de agua a distintas presiones. La capacidad de campo y el punto de marchitez permanente representan el límite superior e inferior respectivamente en los cuales las plantas mesófilas (mayormente las agrícolas) pueden extraer el agua del suelo (Allen et al., 2006).

Capacidad de campo (CC): se define como el contenido de agua que un suelo bien drenado puede retener en contra de las fuerzas de gravedad. También se define como la cantidad de agua que un suelo retiene a una

tensión de 0,1 o a 0,33 bar. Las ecuaciones de pedotransferencia se han diseñado para estimar algunos de los parámetros de la curva de retención de agua del suelo, en función de la textura del suelo (% de arena, limo y arcilla) y del carbono orgánico (%) del mismo (Silva et al., 1998, Hillel, 1998).

Punto de marchitez permanente (PMP) se considera como el contenido de agua del suelo en donde el cultivo (plantas mesófilas) no podrá extraer el agua remanente en el suelo y la extracción de agua será nula. También se define como el contenido de agua retenida a una tensión de 15 bar. Al igual que la capacidad de campo, depende de la textura y la materia orgánica. Al igual que CC, se han diseñado ecuaciones que permiten estimarlo (Silva et al, 1998, Hillel 1998). Agua disponible AD: Es la diferencia en el contenido de agua entre capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; representa la máxima cantidad de agua que la planta puede disponer para su absorción en determinado perfil (Hillel, 1998).

Cambios en la densidad aparente y deterioro de la estructura del suelo también repercuten en la cantidad de agua que dispone para la planta, al afectar el crecimiento radicular y reducir la infiltración del suelo y conductividad hidráulica. La disminución de densidad aparente provoca un aumento en el contenido volumétrico de agua del suelo a igual fuerza de tensión y mejora la conductividad hidráulica lo que favorece la infiltración (López et al., 2018).

### 1.9.3 Compactación y ambiente edáfico

La compactación de las partículas del suelo se refiere al acercamiento del espacio entre partículas en el suelo, provocado por tráfico de animales, maquinarias o factores productivos. Este fenómeno determina que el ambiente edáfico sufra alteraciones repercutiendo en la respuesta en producción de las plantas.

La capacidad de almacenaje de agua, el intercambio de gases, el régimen térmico y la resistencia al crecimiento radicular son alteradas con el aumento de la compactación de los suelos. Las propiedades hidráulicas

como infiltración básica y conductividad hidráulica saturada son también afectadas en gran medida por la compactación del suelo (Jorajuria, 2014).

Según Botta et al. (2010), se produce una caída en la porosidad del suelo y aumento de la densidad aparente bajo el sistema de siembra directa, en comparación con labranza reducida.

La productividad de los cultivos se ve afectada por un gran número de variables físicas del suelo, tales como: densidad aparente, distribución del tamaño de poros y estabilidad de agregados. Las propiedades del suelo que gobiernan el crecimiento radicular son: la resistencia mecánica, la disponibilidad de agua, nutrientes, oxígeno y energía. La determinación del nivel óptimo de estas variables con relación al crecimiento vegetal se dificulta por el hecho de que las mismas están estrechamente correlacionadas entre sí, lo cual se suma a la dificultad ocasionada por su variación en el tiempo y el espacio (Letey, 1985).

#### 1.9.3.1 Propiedades físicas que inciden en la respuesta vegetal

La compactación afecta la capacidad de almacenaje de agua al reducir el espacio poroso en un suelo. La menor capacidad de almacenaje en un suelo establece una mayor dependencia a la recarga del suelo por el riego o por la lluvia.

Un suelo compactado afecta la tasa de difusión de oxígeno y CO<sub>2</sub> afectando la respiración radicular, la dinámica de los nutrientes en el suelo y altera el régimen térmico del suelo, incidiendo en la dinámica de nutrientes. (Singh et al., 2015)

Al aumentar la resistencia y reducir los macroporos, se afecta el crecimiento, y exploración radicular, se reduce el agua disponible para la planta y la absorción de nutrientes poco móviles como el fósforo y potasio. Los cultivos creciendo en suelos compactados pueden presentar alguno de los siguientes síntomas: a) lenta emergencia y desarrollo del cultivo, b) altura de planta irregular, c) deficiencias de nutrientes inducidas, d) crecimiento de

las raíces en forma horizontal, e) fitotoxicidad por falta de movilidad de herbicidas en el perfil del suelo (García et al., 2009).

#### 1.9.4 Estrategias para revertir problemas de compactación en el suelo

El barbecho químico actúa como laboreo biológico, muchas veces es suficiente con un período de barbecho adecuado para resolver condiciones no extremas de compactación superficial por pastoreo (García Préchac, 1998).

Según Martino (1999), el paraplow es una herramienta de laboreo del suelo que puede ser utilizada en sistemas de siembra directa para resolver problemas de compactación sub superficial. El paraplow permite aflojar suelos compactados hasta una profundidad de 50 cm, con muy escaso movimiento del material en superficie. Los resultados del efecto del paraplow se resumen en: a) disminución de la densidad aparente, b) aumento en la tasa de infiltración, c) aumento de evaporación del suelo, d) disminución en la resistencia a la penetración y aumento de la promoción del desarrollo radicular. La respuesta en la mejora del rendimientos de los cultivos con paraplow es errática dependiendo fundamentalmente del efecto año y a la presencia de capas compactadas en el suelo (Ernst et al 2019, Schneider et al 2017).

### 1.10 HIPÓTESIS DEL TRABAJO

- El modelo Aquacrop es lo suficientemente robusto para estimar el rendimiento del cultivo de soja en la zona norte y sensible para captar ajustes en los parámetros del modelo, bajo distintas situaciones agronómicas del cultivo: disponibilidad de agua, cultivares y manejo del suelo previo a la siembra.
- El manejo del suelo previo a la siembra mejoraría las propiedades físico-químicas del suelo, a través del aumento del almacenaje del agua, de la exploración radicular y en consecuencia del rendimiento.

### 1.11 OBJETIVOS

- Ajustar los parámetros del modelo Aquacrop de forma tal que pueda discriminar el efecto del riego, de los cultivares y del manejo del suelo previo a la siembra, en el rendimiento de grano y en los componentes del rendimiento del cultivo de soja.
- Determinar el comportamiento de diferentes cultivares frente a diferentes manejos de suelo previos a la siembra.
- Determinar el rendimiento potencial del cultivo de soja para la zona norte del Uruguay.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 UBICACIÓN DEL ENSAYO

El ensayo fue instalado en el área experimental de la Estación Experimental Facultad de Agronomía en Salto (EEFAS) (31° 22'31'' S, 57° 42'54'' O, altitud 78 m), ubicada en la ruta 31 km 21,5. El suelo del sitio se clasifica como Brunosol Éútrico perteneciente a la Unidad Itapebí-Tres Árboles (cuadro 1). El cultivo antecesor del cultivo fue soja en la zafra 2015-2016.

Cuadro 1. Parámetros hídricos del suelo por horizonte, Brunosol Éútrico (Montoya y Otero, 2016).

Profundidad (cm)	Densidad Aparente	CC (H%V)	PMP (H%V)	AD(H%V)	Ksat (mm día <sup>-1</sup> )	CN
0-10	1,20	55,6	38,2	17,5		
10-15	1,26	52,4	44	8,4		
15-30	1,20	58,9	45,6	13,3	150	86
30-45	1,23	56,9	43,2	13,7		
45-60	1,19	60,9	49,6	11,4		

CC= contenido volumétrico (H%V) en capacidad de campo. PMP= contenido volumétrico (H%V) en punto de marchitez permanente. AD= contenido de agua disponible expresada diferencia entre CC-PMP, Ksat= conductividad hidráulica en fase saturada del suelo (mm.día<sup>-1</sup>), CN= valor de curva número.

### 2.2 DISEÑO DEL ENSAYO

Con la meta de evaluar el desempeño del modelo Aquacrop y ajustar los parámetros necesarios en el cultivo de soja en Uruguay, se eligieron tres factores que definen diferentes situaciones de crecimiento: a) el manejo del suelo previo a la siembra de la soja, b) el contenido de agua en el suelo y c) los cultivares de soja, con sus respectivos niveles.

a) Manejo del suelo previo a la siembra de la soja. Luego de la cosecha del cultivo de verano antecesor (soja), se definieron tres manejos diferentes

del suelo a instalar durante el otoño-invierno: i) uso del paraplow y posterior siembra de trigo con 90 unidades de nitrógeno, ii) siembra de trigo con 90 unidades de nitrógeno sin uso de paraplow y iii) siembra de raigrás sin uso del paraplow. La aplicación de nitrógeno se realizó al voleo en cobertura de forma manual, se fraccionó en tres momentos en el ciclo del trigo (siembra, formación de macollos y elongación de entrenudos) aplicando el equivalente 30 UN (unidad de nitrógeno) ha<sup>-1</sup> en cada uno.

b) Contenido de agua en el suelo. Se definieron dos niveles de agua en el suelo: i) permitiendo un agotamiento máximo del agua disponible (AD) del suelo hasta un 30% y completar el agua del suelo hasta capacidad de campo a través del aporte agua por el riego y ii) permitiendo el agotamiento del agua del suelo de acuerdo a la precipitación y evapotranspiración del cultivo sin uso del riego (secano). El contenido de agua en el suelo fue monitorizado a través de un balance diario de agua del suelo según la evapotranspiración del cultivo. Para estimar el consumo de agua por la planta se utilizó como guía el procedimiento propuesto por FAO-56 (Allen et al., 1998); la lámina de riego se reponía hasta capacidad de campo cada vez que el contenido de agua del suelo descendiera hasta un 30% del AD total en la zona radicular.

c) Cultivares. Se eligieron tres cultivares de soja representativos, con buen potencial de rendimiento de la región, a evaluar en el experimento: i) cultivar NA 5009, ii) cultivar NA 5509 y iii) cultivar NA 6448.

## 2.3 MANEJO DE LOS TRATAMIENTOS Y DEL EXPERIMENTO

### 2.3.1 Manejo del suelo

En el otoño de 2016, luego de la cosecha de soja como cultivo de verano antecesor, se instaló el experimento en el campo, definiendo y marcando las superficies de laboreo. Se efectuó laboreo del suelo con un paraplow a una profundidad de 0,4 m. A continuación se sembraron las coberturas de trigo y raigrás.

Previo a la instalación de la cobertura invernal de trigo y raigrás, se realizó la fertilización con fósforo y potasio usando como referencia los niveles críticos para el cultivo de soja (Barbazán et al 2011, Morón, 2005), basándose en análisis de suelo (cuadro 2), se ajustó la dosis de fertilizante. La fertilización nitrogenada se realizó en tres momentos en el ciclo de la cobertura de trigo. Dicha fertilización se llevó a cabo con el fin de obtener una importante producción de biomasa.

El comienzo del barbecho se realizó 60 días previos de la fecha de siembra prevista para el nuevo cultivo de la soja (1/11/2016). Se aplicó 4,5L ha<sup>-1</sup> de glifosato (480 g L<sup>-1</sup> de ácido) con el fin de matar la cobertura de forma rápida y uniforme en todas las parcelas del experimento.

Cuadro 2. Análisis de suelo previo a la fertilización, junio 2016.

Profundidad cm	pH (H <sub>2</sub> O)	pH ( HCl)	C.ORG (%)	BRAY_1 mgP/g	Ca meq/100 g	Mg meq/100g	K meq/100g
0-15	5,9	4,8	3,32	8,7	20,4	4,4	0,29
15-25	5,9	4,8	2,75	10,2	16,3	4,7	0,35

pH (H<sub>2</sub>O)= pH en agua, pH (HCl)= pH en ácido clorhídrico, C.org (%)= carbono orgánico, BRAY\_1 mg P/g= fósforo Bray 1, Ca= calcio, Mg= magnesio, K= potasio intercambiable.

### 2.3.2 Siembra del cultivo de soja

La fecha prevista para la siembra del cultivo fue inicialmente el 1 de noviembre. Sin embargo, por razones climáticas y de excesos de humedad en el suelo, la siembra se realizó el 2 de diciembre. La densidad de plantación objetivo fue de 45 semillas por m<sup>2</sup>, la distancia entre hileras fue de 0,40 m.

La población lograda fue de 380000 plantas por hectáreas. Las semillas fueron tratadas contra aves (DRAZA, 500 mL cada 100 kg<sup>-1</sup> de semilla), insectos (TIAMETOX 100 mL cada 100 kg<sup>-1</sup> de semilla) y hongos de suelo (ENVÍON 250 mL cada 100 kg<sup>-1</sup> de semilla) para prevenir el daño. La

inoculación de la semilla se realizó instantes antes de la siembra para asegurar una buena nodulación y la planta pueda contar con niveles de nitrógeno suficiente en donde puedan expresar su máximo potencial, se utilizó un inoculante líquido con nombre comercial, Nitronat L a una dosis de 300 mL cada 100 kg<sup>-1</sup> de semilla.

### 2.3.3 Manejo de plagas y enfermedades durante el cultivo

Para el manejo de plagas y malezas se realizó control por presencia, con el objetivo que no hubiese interferencia en las variables evaluadas. Los productos utilizados para control de insectos plagas fueron Rhino 16 g ha<sup>-1</sup>, Novonectin 50 mL ha<sup>-1</sup>, Diflulin 100 mL ha<sup>-1</sup>, Escudo 247 200 mL ha<sup>-1</sup>, para el control de malezas se utilizó Glifosato 480 g L<sup>-1</sup> y se aplicó 3 L ha<sup>-1</sup>.

Para las enfermedades se realizaron controles preventivos según el monitoreo de la fenología del cultivo y las condiciones climáticas. Los productos utilizados para el control de enfermedades fueron Conzerto 800 mL ha<sup>-1</sup>, Stigmarextra 400 mL ha<sup>-1</sup>.

### 2.3.4 Aplicaciones de riego

Se utilizó un sistema de riego por goteo para facilitar el manejo del ensayo y reducir el tamaño de parcelas; mejorar el control del agua dentro del ensayo y reducir pérdidas de agua por evaporación a la hora de aplicar el riego. El sistema estaba compuesto de emisores de goteo (NETAFIM) autocompensantes y antidrenantes. Con un caudal de 1,6 L h<sup>-1</sup> y a 0,5 m de distancia entre emisores en la línea. En el diseño, cada línea de goteros en la parcela estaba conectada al mismo lateral. Para evitar un posible escurrimiento sub superficial y que alcance a una parcela sin riego, se dejó una faja de 3,20 m entre las parcelas regadas y las parcelas de secano.

La capacidad máxima del sistema fue de una lámina bruta de 8 mm h<sup>-1</sup>, para controlar el volumen de agua aplicada se colocaron contadores de agua (Beta LFC DN 40 (6/4") Q3 = 16,0 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>).

El criterio de riego utilizado consistió en mantener el contenido de agua del suelo en el tratamiento con riego siempre por encima del 70% del agua disponible (AD) a la profundidad del sistema radicular; a tal efecto se reponía la lámina de riego hasta capacidad de campo cada vez que el contenido de AD del suelo se redujera en un 30%. La lámina de aplicación osciló entre 14 y 20 mm dependiendo de la evapotranspiración diaria e intervalos entre riegos.

Para la toma de decisión del riego, se utilizó doble metodología:

- a) A través del seguimiento del contenido de agua del suelo, usando un balance diario de agua en el suelo FAO-56 (Allen et al., 1998), a partir de los datos hidráulicos del suelo, de la precipitación efectiva incidente, de la  $ET_0$  calculada en base a los datos registrados por la estación meteorológica INIA SG y utilizando los Kc de acuerdo a la fenología del cultivo (Montoya y Otero, 2017).
- b) A través del monitoreo del contenido de agua del suelo, con sensores de capacitancia FDR (10HS, Decagon, USA) colocados a los 10, 20, 30, 45 y 60 cm de profundidad, en todas las parcelas del cultivar NA5509 del bloque uno. El registro se realizó de forma automática cada 30 minutos.

#### 2.3.5 Datos climáticos

Los registros climáticos fueron recopilados con una estación climática Spectrum (Wachdog, Spectrum, USA) cada 10 minutos; ubicada en la propia estación experimental San Antonio, a una distancia del experimento de 1,5 km. Se registró temperatura; humedad del aire; velocidad promedio y máxima del viento, radiación global incidente y precipitación. Para la estimación de la evapotranspiración diaria (PM-56) se utilizó el procedimiento de la guía FAO-56 con los registros de la Estación Experimental de INIA Salto Grande.

## 2.4 EVALUACIONES

### 2.4.1 Contenido de carbono orgánico lábil del suelo

El análisis del carbono lábil del suelo se realizó en el laboratorio de INIA Salto Grande, tomando como referencia el método propuesto por Blair et al. (1995), modificado por Weil et al. (2003).

La extracción de las muestras de suelo se llevó a cabo antes de la cosecha del cultivo de soja, como forma de evaluar el efecto del cultivo de cobertura. La muestra estaba compuesta de varias extracciones de suelo en toda la parcela a dos profundidades (5 a 10 cm y de 15 a 20 cm). Cada muestra se componía de 0,5 kg de suelo aproximadamente. Luego de extraídas se secaron al aire para luego procesarlas y determinar el carbono lábil.

De cada muestra se tomaron 3 sub muestras de 5 g para tamizarlas en un tamiz de 1 mm, se le añadió una solución de permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>) a una concentración de 0,02 mg L<sup>-1</sup>, con pH 7,2. Se agitó durante 2 minutos, posteriormente se dejó decantar por 10 minutos y se tomó la lectura en el espectrofotómetro. Los resultados de las lecturas de absorción del espectrofotómetro fueron utilizados para calcular el carbono lábil, según la ecuación propuesta por Weil et al., (2003) dónde:

$$\text{C-Activo (mg carbono. kg}^{-1} \text{ de suelo)} = [(\text{Molaridad KMnO}_4)/10 - (\text{a} + \text{b} \cdot \text{A})] \cdot 9000 \cdot 0,02 / 0,005$$

Siendo: a y b = Parámetros obtenidos en la curva patrón previamente realizada cada día antes del análisis y A=absorbancia (550 nm)

### 2.4.2 Resistencia a la penetración del suelo

La resistencia a la penetración se determinó en cada parcela en 4 momentos posteriores al laboreo inicial del suelo. a) inmediatamente antes de la siembra de la soja, b) 40 días posteriores a la siembra de la soja, c) en floración del cultivo de soja (R1) setenta días de la siembra, y d) antes de cosecha de la soja, diez meses después del laboreo con paraplow.

Se utilizó un penetrómetro de cono (30°) para evaluar la resistencia a la penetración en el suelo; se midió la resistencia en dos puntos al azar dentro de cada parcela. El equipo permite el registro de resistencia a la penetración en intervalos de 2,5 cm de profundidad en el perfil del suelo. El contenido hídrico del suelo al momento de determinar la resistencia a la penetración siempre estuvo a valores muy próximos a capacidad de campo, debido a que se esperaba la ocurrencia de lluvias que lograran saturar el perfil del suelo y luego de transcurridas 24 a 36 horas de ocurridas las mismas se realizaba la evaluación.

#### 2.4.3 Densidad aparente del suelo

La densidad aparente del suelo se determinó antes de la cosecha de la soja, en dos profundidades (5 a 10 y de 15 a 20 cm). El método del cilindro (Blake y Hartge, 1986) se utilizó para determinar la densidad aparente, se tomó dos muestras por parcela.

El método del cilindro consiste en introducir en el suelo un cilindro biselado de volumen conocido y obtener una muestra del suelo imperturbado. En el presente estudio se utilizó un cilindro metálico de 100 mL. La muestra se seca a 105°C hasta peso constante para determinar la masa de suelo seco. El cálculo de la densidad aparente se realiza con la siguiente ecuación:

$$D_{Ap} \text{ (g mL}^{-1}\text{)} = \text{peso suelo seco (g)} / \text{volumen del cilindro (mL)}.$$

#### 2.4.4 Evolución de la fenología

La evolución de la fenología del cultivo se registró cada tres días usando la escala de Fehr y Caviness (1971) como guía para la definición de cada estado fenológico del cultivo. La observación se realizó en todas las parcelas del experimento.

#### 2.4.5 Evolución de la cobertura del cultivo de soja

La evolución de la cobertura verde del follaje se realizó mediante fotografías periódicas, tomadas perpendiculares al cultivo, a una distancia de

0,70 m sobre la superficie de la canopia. Para medir la cobertura verde del follaje en la parcela, se tomaron 3 imágenes en cada parcela, con una cámara digital GoPro (Hero3, USA) colocada en un soporte de tal manera que no hubiera sombras en las imágenes. La altura de la cámara desde el suelo fue variable a través del desarrollo del cultivo, de tal forma que permitiera siempre abarcar el mismo número de hileras, en este caso, 3 hileras en cada una de las imágenes registradas. Para determinar el grado de cobertura se calculó el porcentaje de píxeles verdes en cada imagen sobre el total de píxeles de la imagen utilizando el programa *Easy Leaf Area* (Easlon y Bloom, 2014).

#### 2.4.6 Evolución de la biomasa del cultivo y determinación del área foliar

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron 8 muestreos para determinar la evolución de la biomasa sobre la superficie del suelo cada 10 días. Cada muestra consistió en recoger todas las plantas de cada parcela comprendidas en una longitud de 0,50 m en la hilera. Las plantas se cortaron a ras del suelo, se pusieron en bolsas plásticas y se llevaron al laboratorio para su posterior evaluación. En el laboratorio, cada muestra de plantas comprendidas en el muestreo de 0,50 m, se contaron y registraron el número de plantas y el peso fresco, el peso seco de cada uno de los componentes de la planta cosechados: hojas, tallos y cuando fue oportuno, el número y peso de vainas y granos, y granos por vaina.

El área foliar de cada planta en cada muestreo fue medida con un medidor de área foliar (LICOR-3000, USA), midiendo todas las hojas de cada planta individual.

#### 2.4.7 Distribución del sistema radicular

A 95 días de la siembra del cultivo de soja, luego del comienzo de llenado de grano, se realizó la determinación de la profundidad y distribución del sistema radicular. Se implementó el método de calicata o de perfil cultural (Box, 1987) que es un procedimiento destructivo realizado mediante excavaciones. Se realizó una calicata con excavadora a lo largo de todo un

bloque de 0,60-0,70 m de profundidad y 0,80 m de ancho. Luego de la excavación, se procedió a limpiar todos los terrones de tierra en la pared antes de realizar el conteo de raíces y con un cuchillo se procedió a exponer todas las raíces en el perfil lateral del suelo. Posteriormente a exponer todas las raíces en la superficie del perfil vertical, se colocó una rejilla cuadrículada de alambre con celdas de 2 cm de lado como guía para poder contar las raíces en el suelo. La rejilla o grilla tenía un tamaño de 0,70 m de profundidad y 1,5 m de ancho. Se tomaron 4 imágenes digitales y perpendiculares al perfil vertical del suelo en cada grilla para cada posición dentro de la parcela; cada imagen correspondió a un cuadrante de la grilla vertical. Finalmente, los datos de cada imagen fueron digitados en una planilla Excel con el mismo número de celdas por imagen y por grilla. En cada imagen se respetó el número de celdas (2 x 2 cm) en filas y columnas, donde se registró la presencia o ausencia de raíces dentro de cada celda. En cada grilla, (compuesta de 4 imágenes) se calculó la frecuencia de raíces a las distintas profundidades en función del total de raíces del perfil (celdas con raíces).

#### 2.4.8 Cosecha y componentes del rendimiento

La cosecha se realizó en forma manual con un contenido de humedad en granos promedio de 13 %, en todas las parcelas; las plantas fueron embolsadas para su posterior trilla con una trilladora experimental (Marca Feretti, Modelo MTR 602). El área cosechada dentro de la parcela fue de 9,6 m<sup>2</sup>, se determinó el rendimiento en granos kg ha<sup>-1</sup>, el n° de granos por planta, el n° vainas por planta, el peso de mil granos y % de humedad de los granos al momento de cosecha.

### 2.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental fue de parcelas subdivididas con tres bloques completos al azar. La parcela principal correspondió al factor manejo de suelo y tuvo tres niveles (Paraplow, Raigrás, Trigo), la sub parcela correspondió al factor contenido hídrico del suelo y tuvo dos niveles (riego y

secano) y la subsub parcela correspondió al factor cultivar con tres niveles (NA5009, NA5509, NA6448).

De la combinación de factores y niveles se determinaron 18 tratamientos, con tres repeticiones, haciendo un total de 54 parcelas. El tamaño de la parcela fue de 1,6 m de ancho y 20 m de largo. El arreglo espacial de las parcelas en los tres bloques completos lo vemos en la figura 1.

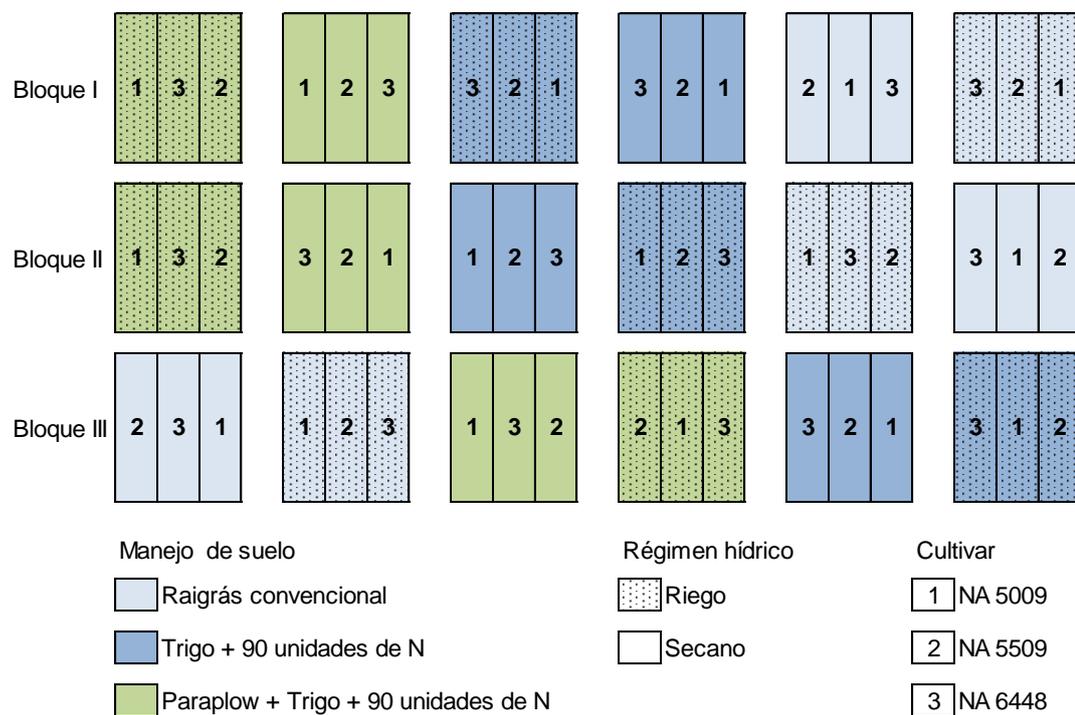


Figura 1. Croquis del ensayo en el campo

### 2.5.1 Modelo estadístico:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + b_r + \varepsilon_{il} + \beta_j + \varnothing_{ij} + \varepsilon_{ij} + \chi_k + \delta_{ik} + \gamma_{jk} + \eta_{ijk} + \rho_{il} + sp_{jil} + SSP_{kijl} + \varepsilon_{ijkl}$$

$y_{ijkl}$  = Es la variable de respuesta.

$\mu$  = Es la media poblacional.

$\alpha_i$  = Es el efecto de la parcela principal (Manejo previo de suelo).

$\beta_j$  = Es el efecto de la sub parcela (Contenido hídrico del suelo).

$\chi_k$  = Es el efecto de la sub sub parcela (Efecto del cultivar).

$\delta_{ik}$  = Efecto de la interacción (Manejo previo de suelo, Efecto del cultivar).

$\varnothing_{ij}$  = Efecto de la interacción (Manejo previo de suelo, Contenido hídrico del suelo)

$\gamma_{jk}$  = Efecto de la interacción (contenido hídrico y cultivar).

$\eta_{ijk}$  = Efecto de la triple interacción (Manejo previo de suelo, Contenido hídrico del suelo y cultivar).

$b_r$  = Efecto del bloque.

$\rho_{il}$  = Efecto de la parcela principal.

$sp_{jil}$  = efecto de la sub parcela.

$SSP_{kijl}$  = efecto de la sub-sub parcela.

$\varepsilon_{il}$  = Error asociado a la parcela principal.

$\varepsilon_{ij}$  = Error asociado a la sub-parcela.

$\varepsilon_{ijkl}$  = Error experimental.

$i = 1, 2, 3$

$j = 1, 2$

$k = 1, 2, 3$

## 2.6 MODELO AQUACROP

### 2.6.1 Identificación de los parámetros más relevantes para la calibración

La identificación primaria de los parámetros más relevantes para el ajuste del modelo, se basó en el manual de usuario del modelo (Raes et al., 2017) y en trabajos de calibración del cultivo de soja con el modelo Aquacrop (Montoya et al., 2017, Giménez et al., 2017). Posteriormente, se realizaron pruebas de ensayo y error con sucesivas corridas en el modelo y observando el impacto del ajuste de los parámetros en el resultado simulado.

Los parámetros identificados de incidencia notoria en la producción estimada se encuentran en el cuadro 3. Los parámetros conservativos son aquellos que no cambian con el tiempo: prácticas de manejo, clima ni ubicación geográfica (Raes et al., 2017). Los parámetros no conservativos varían dependiendo de las variedades y de las situaciones específicas del lugar.

Cuadro 3. Parámetros de mayor interés en la calibración del modelo Aquacrop.

<b>Símbolo</b>	<b>Fenología del Cultivo</b>	<b>Tipo</b>
CC0	Superficie cubierta por planta a la emergencia ( $\text{cm}^2.\text{pl}^{-1}$ )	Conservativo
	número de planta por hectáreas	No conservativo
	tiempo de siembra a emergencia (días)	No conservativo
CGC	Coeficiente de crecimiento de la canopia	Conservativo
CCx	Máxima cobertura alcanzada	
	tiempo de siembra a comienzo de senescencia	No conservativo
CDC	Coeficiente de senescencia de la canopia ( $\% \text{ dia}^{-1}$ )	No conservativo
<b>Floración</b>		
	Tiempo de siembra a floración	No conservativo
	Duración de la floración	No conservativo
	Determinancia del cultivo	No conservativo
<b>Desarrollo radicular</b>		
Zn	Mínima profundidad radicular (m)	No conservativo
Zx	Máxima profundidad efectiva radicular	No conservativo
<b>Traspiración del cultivo</b>		
Kctx	Coeficiente de traspiración del cultivo	Conservativo
<b>Biomasa producción y formación de rendimiento</b>		
WP*	Productividad de agua normalizada por ETo y CO <sub>2</sub> ( $\text{g.m}^2$ )	Conservativo
Hio	Índice de cosecha	No conservativo
<b>Estrés hídrico</b>		
Pexp ,lower	Umbral superior expansión de la canopia	Conservativo
Pexp ,upper	Umbral inferior expansión de la canopia	Conservativo
	Factor de curvatura para la expansión de la canopia	Conservativo
Psto	Umbral superior para la regulación estomática	Conservativo
	Factor de curvatura para el control estomático	Conservativo
P sen	Umbral superior para senescencia	Conservativo
	Factor de curvatura para senescencia	Conservativo

### 2.6.2 Calibración de los parámetros

Inicialmente se utilizaron los valores de los parámetros propuestos por Raes et al. (2017), Montoya et al. (2017), Giménez et al. (2017), y Abi Saab et al. (2014). De los parámetros previamente ajustados por estos autores se realizó una comparación entre estos valores propuestos con valores ajustados que podrían tener estos parámetros en este experimento. Para esta tarea, se utilizaron los datos obtenidos en campo, dónde mediante

prueba de ensayo y error se realizó un ajuste de los parámetros considerados. Posteriormente, comparando los resultados estimados con los datos observados en el campo, se definió un valor probable del parámetro. Por último, se evaluó el desempeño del ajuste, utilizando los datos de salida del modelo y los datos de la situación específica simulada.

Para la evaluación del rendimiento del modelo, se calcularon diferentes indicadores estadísticos: Coeficiente de Correlación de Pearson, Cuadrado Medio del Error, Cuadrado Medio del Error Normalizado, Modelo de Eficiencia (Nash-Sutcliffe), e Índice de Concordancia (Willmott's). Se definieron previamente los valores objetivos a alcanzar en cada el indicador.

### 2.6.3 Uso de los parámetros calibrados para representar las diferentes situaciones evaluadas en el ensayo

Para poder evaluar el comportamiento del modelo en cada situación en particular que fue representada en campo, se determinaron los parámetros que caracterizaban a cada situación y se ingresó al modelo el valor obtenido para la situación que se quería simular. Luego se calcularon los indicadores estadísticos de los valores arrojados por el modelo y los valores registrados en campo. Y se analizó la habilidad del modelo en representar la situación particular, calculando los mismos indicadores utilizados en la calibración.

## 2.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar el análisis estadístico de las variables obtenidas en el cultivo y en el suelo, se utilizó el software InfoStat/P (Di Renzo, et al., 2008). Se realizó análisis de varianza (ANAVA) y luego en los análisis que se rechazó la hipótesis nula. Se realizó el test de Tukey ( $p < 0,05$ ) para comparar entre las media de los tratamientos.

Para el análisis de raíces se utilizó el software Microsoft Excel® para elaboración de planillas y para el procesamiento inicial de las variables.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

En el período entre siembra y cosecha la evapotranspiración máxima del cultivo (ET<sub>c</sub>) fue de 554 mm, mientras que la oferta de agua por precipitaciones fue de 667 mm. Si bien la oferta supera significativamente la demanda, la distribución de los eventos de lluvia durante la estación del cultivo y la variabilidad en el volumen precipitado, fue necesario aplicar, una lámina neta de riego de 272 mm durante el ciclo para lograr cubrir la demanda por evapotranspiración del cultivo y los criterios planificados de manejo del riego.

Las precipitaciones fueron abundantes durante el verano; la distribución en el tiempo y en volumen de los eventos de lluvia, ocasionaron períodos de excesos de lluvia y períodos de déficits en los cuales se registraron descensos significativos del contenido hídrico del suelo en los tratamientos en secano. Los eventos de déficit hídrico coincidieron con el estado fenológico de floración (R1-R3), la primera etapa de llenado de granos (R5) y luego en la etapa de maduración del cultivo (R6-R8). El rendimiento promedio de los tratamientos en secano estuvo en 1032 kg ha<sup>-1</sup> por debajo del promedio de los tratamientos regados.

#### 3.2 BALANCE HÍDRICO

La evolución del contenido de agua en el suelo para los tratamientos en secano (figura 2) muestra descensos en el contenido de agua que perduran de 10 a 20 días. Se destaca la importancia del riego incluso en años con abundantes precipitaciones, de diciembre de 2016 hasta abril de 2017 la precipitación acumulada fue de 667 mm e igualmente el cultivo enfrentó períodos con descensos importantes del contenido de agua del suelo.

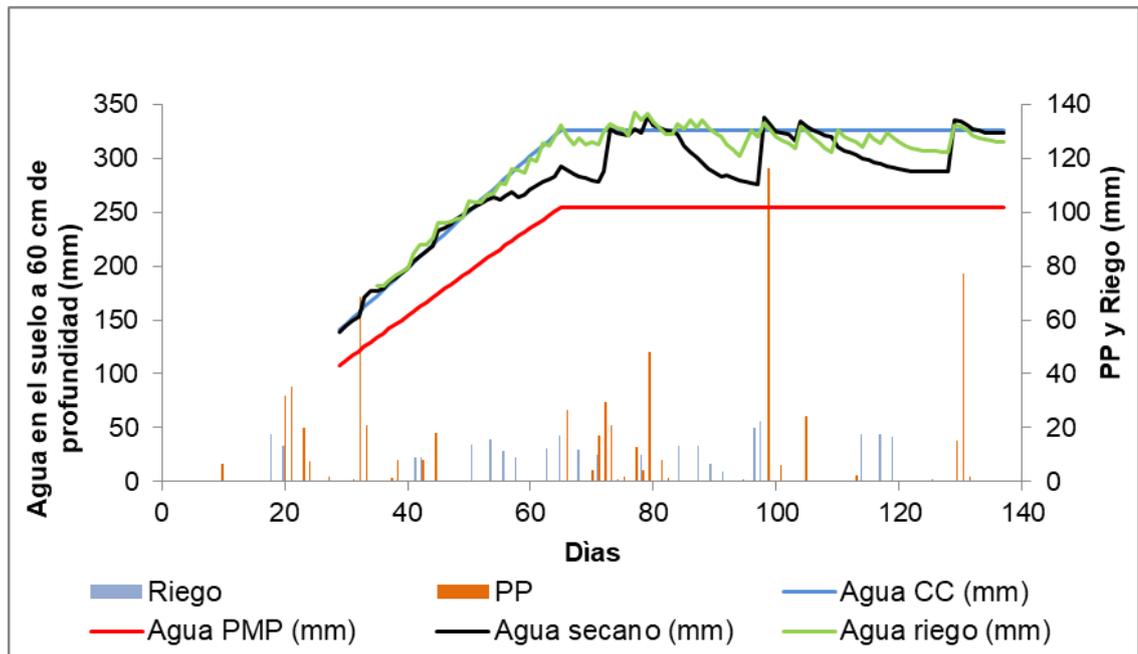


Figura 2. Evolución del contenido de agua del suelo (mm) en el cultivo de soja con y sin riego, en manejo del suelo previo con cobertura de raigrás, medido con sensores FDR. PP=precipitación (mm). Agua secano= evolución del agua en el suelo (mm) para el tratamiento sin riego. Agua riego= evolución del agua en el suelo (mm) para el tratamiento con riego. Riego= lámina neta de agua aplicada (mm). Agua CC= contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (mm) a profundidad radicular. Agua PMP=contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente (mm) a profundidad radicular.

### 3.3 RESISTENCIA DEL SUELO A LA PENETRACIÓN

A los 150 días luego de realizado el subsolado del suelo con el paraplow, se observó menor resistencia a la penetración en las parcelas de los manejos que no recibieron laboreo profundo (trigo solo y raigrás solo). En las evaluaciones posteriores a 150 días después de paraplow (DDP), aumentó la resistencia a la penetración del suelo en el tratamiento de paraplow en relación a la medida realizada a 150 días, este aumento de la resistencia se da primero en superficie y luego en profundidad. A 320 DDP el

manejo con paraplow solo presentó menor resistencia a la penetración que los demás manejos en el rango comprendido entre los 22 y 35 cm del perfil, coincidiendo con el estrato dónde trabaja la púa de la herramienta y logra la mayor perturbación del suelo. Braim et al., 1984, Busscher et al., 1988, Ehlers y Baeumer, 1988, Hipps y Hodgson 1988, citados por Martino 1999 reportan la profundidad donde se produce el máximo aflojamiento del suelo entre 20 a 35 cm.

En los manejos con coberturas de trigo y raigrás sin paraplow no se observó variaciones en la resistencia a la penetración.

El efecto del paraplow es bastante consistente en la reducción de la resistencia a la penetración (Ernst y Bentancur 2004, Martino 1998), los resultados obtenidos, coinciden con lo reportado por Ernst et al. (2019), luego de una inmediata disminución de la resistencia a la penetración ocurre un rápido aumento de la resistencia en el corto plazo (18 meses), volviendo a la condición anterior sin laboreo profundo.

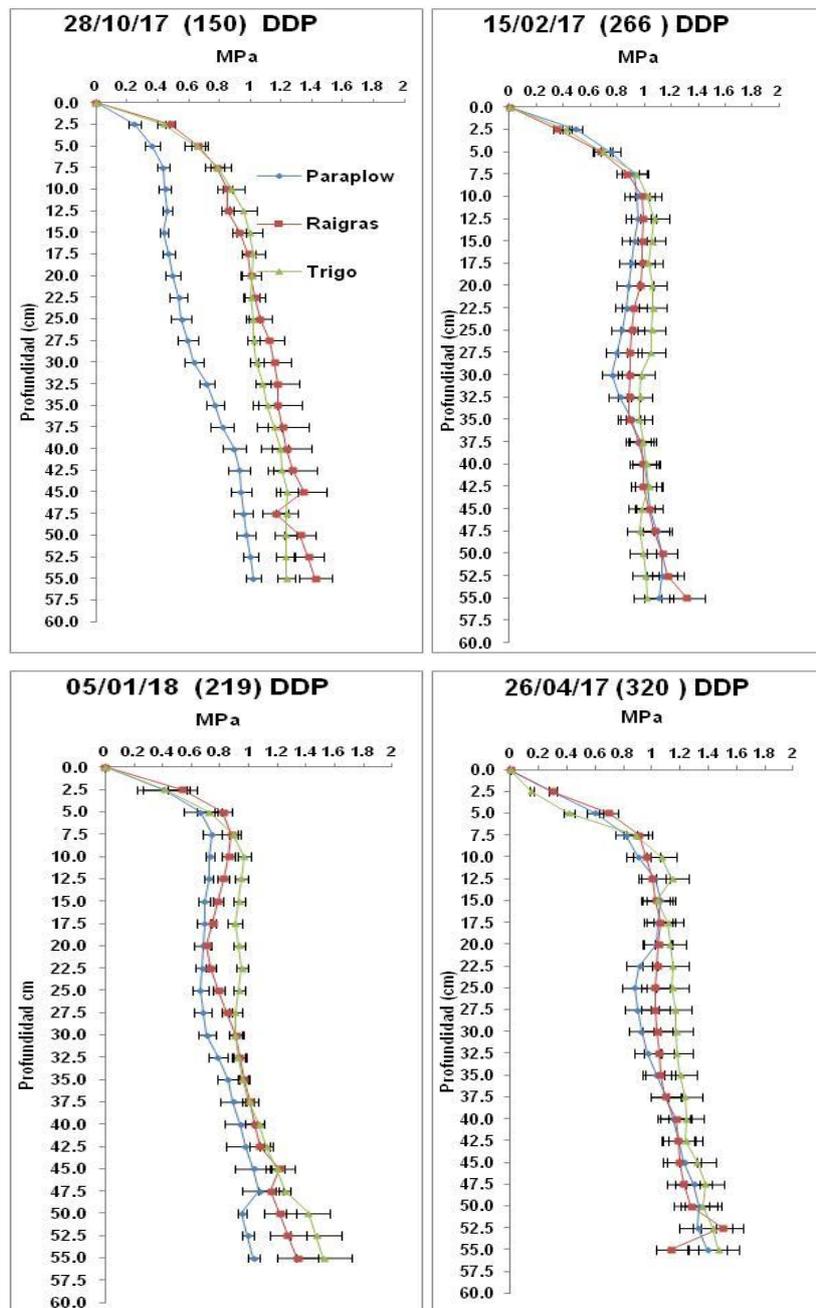


Figura 3. Resistencia media a la penetración del suelo (MPa) en cuatro momentos. DDP= días después de laboreo con paraplow. Manejos de suelo previo al cultivo de soja (Raigrás= cobertura de raigrás, Trigo= cobertura de trigo, Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo). Barras corresponden a desvío estándar entre las mediciones a cada profundidad, n= 12.

### 3.4 DENSIDAD APARENTE DEL SUELO

No se registraron diferencias significativas en la densidad aparente (Da) del suelo en ninguna de las profundidades analizadas para los manejos y régimen hídricos del suelo considerados, por lo que no es de esperar cambios en el contenido de agua asociados a la capacidad de almacenaje del suelo. Además, si comparamos los valores de Da con los obtenidos en el momento que se realizó la caracterización del suelo (Cuadro 4) se observa que no hubo cambios importantes de la Da en las profundidades de 10 y 20 cm luego de transcurrido un año de la evaluación. Estos resultados difieren de los encontrados por Martino (1994), probablemente porque el suelo utilizado por Martino presentaba problemas de compactación evidentes, en cambio el suelo usado en este ensayo no presentó problemas de compactación.

Cuadro 4. Densidad aparente media del suelo en la cosecha del cultivo de soja en dos profundidades, para manejo de suelo previo y régimen hídrico (Abril 2017).

Manejo	Agua	Densidad Aparente			
		Profundidad (10 cm)		Profundidad (20 cm)	
Paraplow		1,20	ns	1,18	ns
Raigrás		1,21		1,19	
Trigo		1,18		1,22	
	Riego	1,21	ns	1,21	ns
	Secano	1,19		1,18	
Manejo		0,413*		0,495*	
Agua		0,482*		0,142*	
Manejo*Agua		0,261*		0,524*	

Manejo= manejo de suelo previo al cultivo de soja (Raigrás= cobertura raigrás, Trigo= cobertura trigo, Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo). Agua= régimen hídrico en el cultivo de soja (riego, secano). \*=  $p < 0,05$ , ns= sin diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ),  $n=6$ .

### 3.5 CARBONO LÁBIL DEL SUELO AL FINAL DEL CULTIVO

El carbono lábil del suelo es un indicador a corto plazo de los cambios de calidad del suelo; es un índice más sensible en la detención de cambios de prácticas de manejo en el suelo que el carbono orgánico del suelo (Gilsanz y Peralta, 2015).

No se evidenciaron cambios en el carbono lábil a causa de los factores estudiados en el experimento.

Cuadro 5. Carbono lábil medio del suelo a cosecha del cultivo de soja a dos profundidades, para manejo de suelo previo, régimen hídrico y cultivar (Abril 2017).

Manejo	Agua	Cultivar	C lábil profundidad 10 (cm)	C lábil profundidad 20 (cm)
Paraplow			570,1 ns	545,5 ns
Raigrás			589,0	534,3
Trigo			560,0	553,2
	Riego		568,2 ns	558,9 ns
	Secano		577,8	529,8
		NA 5009	592,1 ns	532,1 ns
		NA 5509	544,6	527,1
		NA 6448	582,4	573,8
Manejo			0,148 *	0,549 *
Agua			0,741 *	0,179 *
Cultivar			0,051 *	0,250 *
Manejo* Agua			0,651 *	0,426 *
Manejo* Cultivar			0,668 *	0,965 *
Agua *Cultivar			0,735 *	0,646 *
Manejo*Cultivar*agua			0,513 *	0,654 *

Manejo= manejo de suelo previo al cultivo de soja (Raigrás= cobertura raigrás, Trigo= cobertura trigo, Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo). Agua= régimen hídrico en el cultivo de soja (riego, secano). Cultivar= cultivares de soja (NA 5009, NA 5509, NA 6448). \*=  $p < 0,05$ , ns= sin diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ),  $n=3$ .

Los diferentes manejos planteados no fueron lo suficientemente contrastantes para ocasionar cambios en esta variable en el corto plazo. La condición inicial del suelo podría enmascarar algún efecto de los tratamientos en el carbono lábil. El carbono orgánico antes de instalar el experimento fue de 3,32 % en el horizonte A, similar a un suelo de referencia descrito por (Álvarez et al., 1976).

### 3.6 DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICULAR EN SOJA

#### 3.6.1 Distribución radicular según manejo de suelo

La distribución radicular de la soja no se alteró por el efecto del paraplow a diferencia de lo reportado por Hipps y Hodgson (1988) citado por Martino (1998), donde encontraron mayor exploración radicular luego del laboreo con paraplow asociado a menor resistencia a la penetración y aumento del volumen poroso.

En los tratamientos pertenecientes a trigo se observó un perfil radicular diferente a los presentados por los manejos paraplow y el raigrás. La diferente distribución de raíces en el tratamiento de trigo pudo estar asociada a diferentes características del suelo, y no a un efecto propio del manejo previo. Cabe aclarar que este análisis realizó en un bloque del experimento.

No se observó presencia de horizontes compactados de acuerdo con los registros de resistencia a la penetración del suelo. Sin embargo, al observar la figura 4 se puede ver que existen horizontes que podrían estar enlenteciendo el crecimiento de las raíces alrededor de los 30 cm de profundidad.

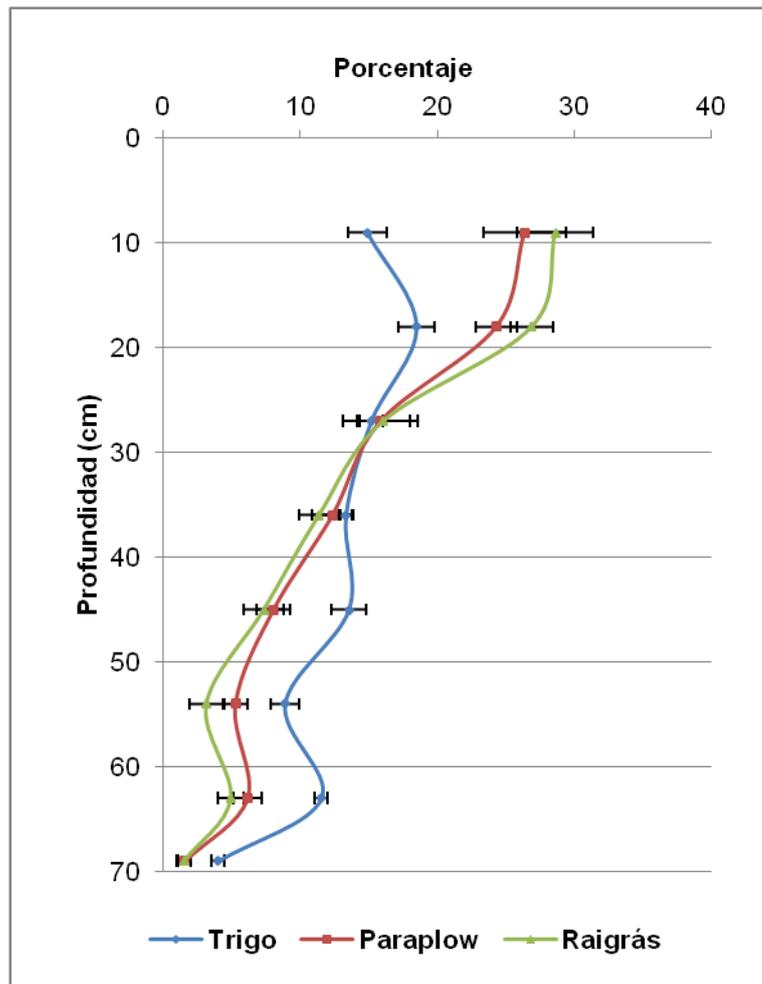


Figura 4. Distribución radicular del cultivo de soja en tres manejos de suelo previos. Trigo= cobertura de trigo. Raigrás= cobertura de raigrás. Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo. Porcentaje= porcentaje de celdas (2 x 2 cm) con raíces en relación al total de celdas con raíces en el perfil del suelo. Barras corresponden al desvío estándar entre todas las mediciones a cada profundidad, n=6.

Se observó un descenso pronunciado en la proporción de raíces en profundidades mayores de 25 cm. La presencia de horizontes con mayor contenido de arcilla a partir de esa profundidad de suelo pudo afectar el crecimiento de raíces resultando en menor cantidad de raíces a profundidades mayores. Micucci y Taboada (2006) reportan que si existen

horizontes sub superficiales con contenidos de arcilla mayores a 35 % se afectaría el crecimiento radicular en soja. Alrededor del 80 % de las celdas con raíces se encontraron en los primeros 30 cm del perfil en los manejos paraplow y raigrás, en trigo la distribución fue más uniforme en profundidad (figura 4).

Los valores máximos de resistencia registrados (figura 3) son bastante inferiores al umbral crítico reportados por Ernst et al. (2019), Gil (2005) y Martino (1999). Umbrales de resistencia a partir de los cuales no permite el crecimiento radicular (2 MPa), el cual se mantiene para un amplio número de suelos y cultivos. Martino, (1999) explica que se produce una reducción importante de la tasa de crecimiento de raíces a niveles inferiores de resistencia. Los valores máximos (1,5 MPa) registrados durante el experimento son sensiblemente inferiores al umbral de 2 Mpa reportado. Todo indica que en los manejos de suelo probados no existieron diferencias en la resistencia a la penetración suficientes como para reducir el crecimiento y modificar la distribución radicular.

### 3.6.2 Distribución radicular en riego y secano

Se observó mayor proporción de raíces en secano comparado con el riego en los primeros 10 cm de profundidad del perfil. Se encontraron raíces en el horizonte C a 70 cm de profundidad en los tratamientos con y sin riego. Parece claro que la exploración se encuentra limitada por profundidad de suelo. La especie podría alcanzar profundidades radiculares de alrededor de 2 m si el suelo lo permitiera (Andriani et al., 1997).

Con riego se logró mayor exploración radicular en los horizontes más profundos en comparación con el secano, pero no se registró diferencias en la distribución radicular en el ambiente con y sin riego. Según Gil (2005), el crecimiento de raíces se produce en suelos con buenos contenidos de humedad. La distribución de raíces en el perfil se altera cuando el suelo presenta estratos con condiciones diferentes para el crecimiento radicular. El ambiente con riego presentó mayor cantidad de raíces a R5 pero no se

diferenció con el secano en la distribución radicular en profundidad. Posiblemente porque fue un año con precipitaciones abundantes y no se dieron las condiciones hídricas desfavorables para modificar la distribución de las raíces en los tratamientos sin riego.

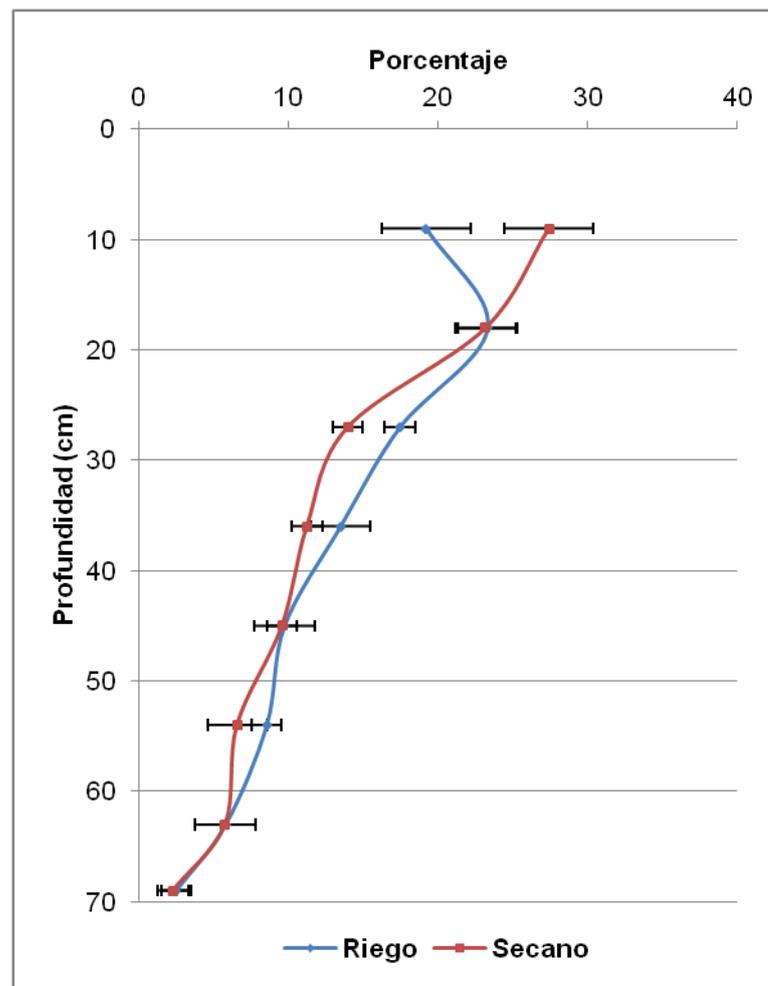


Figura 5. Distribución radicular del cultivo de soja en riego y secano. Porcentaje de celdas (2 x 2 cm) con raíces en relación al total de celdas con raíces en el perfil de suelo. Riego= con riego, Secano= sin riego. Barras corresponden al desvío estándar entre todas las mediciones a cada profundidad, n=9.

### 3.7 EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO DEL SUELO

En los tratamientos con riego, la evolución del agua en el suelo es muy similares entre los manejos (Figura 6). A diferencia de lo esperado por la

relación entre propiedades físicas y la dinámica del agua en el suelo. No se observaron diferencias en la evolución del contenido de agua del suelo.

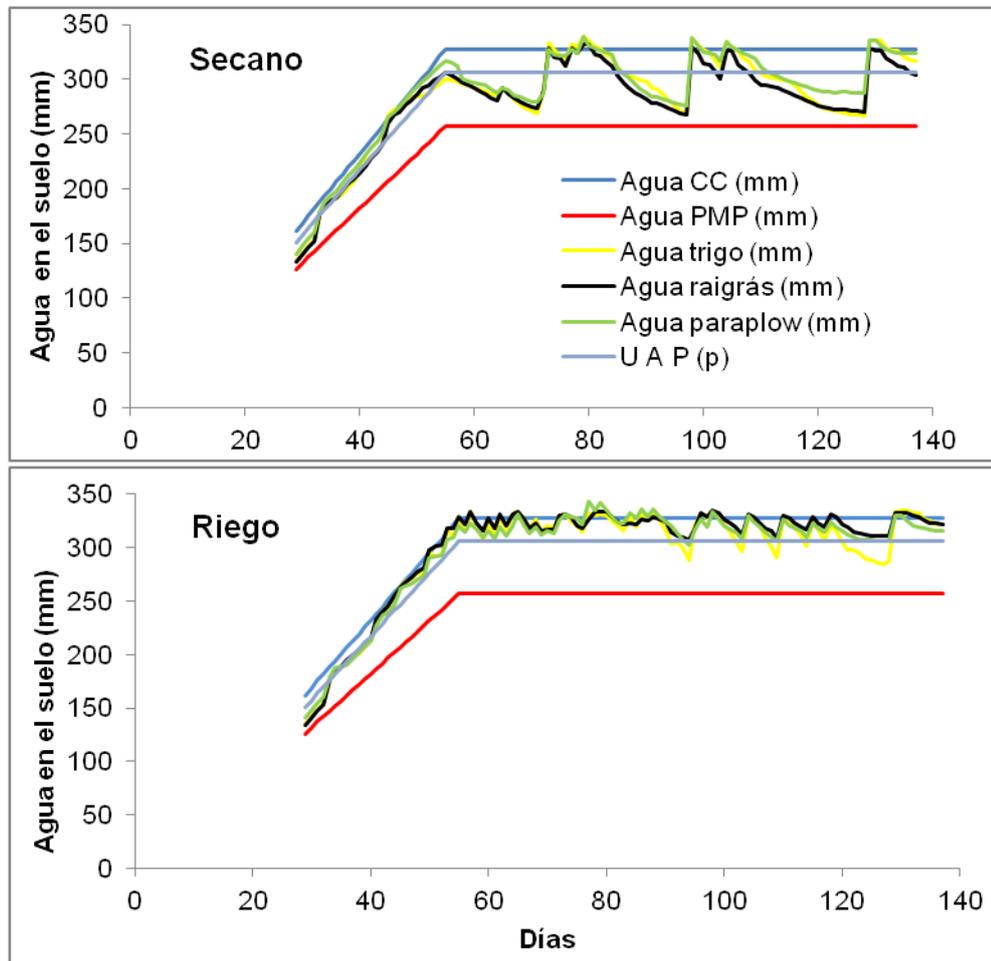


Figura 6. Evolución del contenido de agua del suelo en el cultivo de soja con riego (Riego) y sin riego (Secano) en tres manejos previos de suelo (Sensores FDR). –Agua raigrás (mm)= evolución del agua con manejo de suelo previo con cobertura de raigrás. –Agua paraplow (mm)= evolución del agua en el manejo de suelo previo de laboreo con paraplow y cobertura de trigo. –Agua trigo (mm)= evolución del agua con manejo de suelo previo con cobertura de trigo. –Agua CC=contenido de agua en el suelo (mm) a capacidad de campo. –Agua PMP=contenido de agua en el suelo (mm) a punto de marchitez permanente. –UAP (p)= umbral de agotamiento permitido (mm).

La frecuencia de aplicación de la lámina de riego, el umbral de agotamiento permitido (P=30% AD) y la distribución y volumen de las precipitaciones no permitieron la discriminación de diferencias en el contenido de agua del suelo en los diferentes manejos del suelo estudiados.

Para los tratamientos en secano el manejo previo con paraplow presentó mayores volúmenes de agua en el suelo que el trigo y raigrás en la mayoría de los registros. En secano se observaron tres descensos significativos del contenido de agua en el suelo que afectaron el crecimiento del cultivo. Según Martino (1998, 1994) el paraplow favorece la recarga del suelo aumentando la tasa de infiltración logrando captar más agua frente a un evento de lluvia, la mayor infiltración podría ser la responsable del mayor contenido de agua en el suelo registrado en el manejo con paraplow.

### 3.8 VARIABLES EN EL CULTIVO

#### 3.8.1 Fenología

Se observó una reducción del ciclo del cultivo entre 4 y 5 días en los tratamientos de secano con respecto a los regados, en el cultivar de ciclo más largo (NA6448). Las diferencias observadas en este cultivar se debieron fundamentalmente a una mayor velocidad de maduración en la etapa fenológica comprendida entre R6 y R8 por parte del cultivo en secano. Es frecuente el acortamiento de las etapas fenológicas de fructificación y llenado de grano en presencia de estrés hídrico (Kantolic, 2008). Para los demás cultivares -más cortos-(NA5009, NA5509) no se evidenció diferencias en el largo del ciclo total entre el ambiente con y sin riego (Figura 7).

Capurro et al. (2016), en ensayos con soja en el sur del país, evidenció un acortamiento del ciclo del cultivo provocado por el estrés hídrico. Cabe destacar que si bien durante el ciclo del cultivo, hubo períodos de déficit hídrico en el ambiente sin riego, los mismos no fueron de duración e intensidad suficiente como para producir un acortamiento del ciclo en los cultivares más cortos.

Como era de esperar, se registraron diferencias en la duración del ciclo total entre cultivares; el cultivar más corto (NA5009) alcanzó el estado de R8, 11 días antes que el cultivar más largo (NA 6448). El cultivar NA 5509, se ubicó en una posición intermedia, pero con un comportamiento similar al ciclo de NA 6448. Las pequeñas diferencias en longitud del ciclo entre cultivares, podrían ser suficientes para observar reducciones en el rendimiento en granos del cultivo, cuando éstas se dan en el período crítico de la soja.

No se observaron cambios en la duración de las etapas fenológicas del cultivo debido al manejo previo del suelo a la siembra.

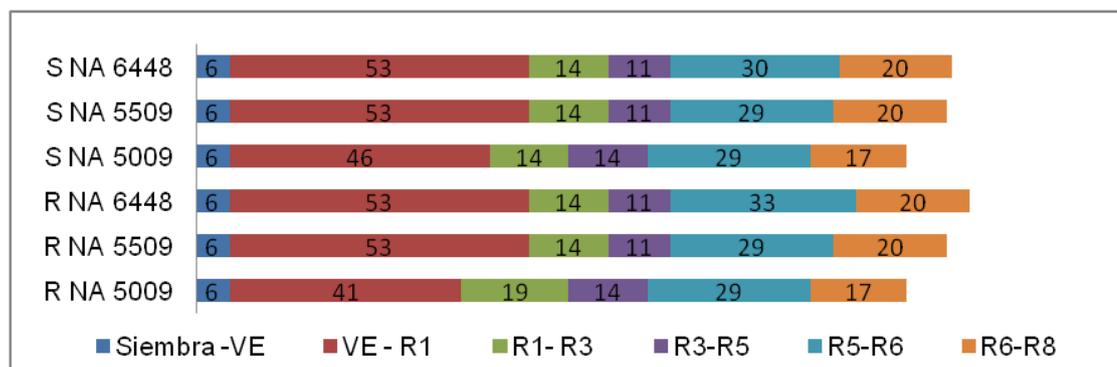


Figura 7. Duración de las diferentes etapas fenológicas en el cultivo de soja (días), según cultivar en riego y secano (siembra 2/12/2016). S NA 6448, S NA 5509, S NA5009= cultivares en secano. R NA 6448, R NA 5509, R NA5009= cultivares con riego. VE= emergencia. R1= inicio de floración. R3= inicio de formación de vainas. R5= inicio de llenado de granos. R6= fin de llenado de granos. R8= maduración completa.

### 3.8.2 Relación entre cobertura verde del cultivo y IAF

Se evidenció una alta relación entre los valores observados de cobertura del cultivo (%) con el IAF (riego  $r^2= 0,77$ , secano  $r^2= 0,87$ ). La relación entre el porcentaje de cobertura y el IAF no cambia entre los cultivares (NA5009  $r^2= 0,85$ , NA5509  $r^2= 0,81$ , NA6448  $r^2= 0,81$ ). Sin embargo, se observó una menor relación entre ambas características en el

manejo con paraplow ( $r^2 = 0,76$ ), que la obtenida en el trigo ( $r^2= 0,86$ ) y raigrás ( $r^2= 0,81$ ).

Por otro lado, se compararon valores estimados de la cobertura del cultivo (%) a partir del IAF medido en el campo usando la ecuación propuesta por Hsiao et al. (2009), con los valores de cobertura del cultivo medidos en el campo (Figura 8). Se encontró muy buena concordancia entre los valores de cobertura observados y los estimados a través del IAF superando un  $r^2$  de 0,98 para todos los factores probados.

La interacción entre el manejo previo a la siembra, el cultivar o la presencia de riego, no fueron significativos para la cobertura del cultivo (%) ni para el IAF. Dado que no se encontraron diferencias significativas en las interacciones de los factores es posible evaluar el efecto de los factores principales independientemente (Balzarini et al., 2008). Se observaron diferencias en CC (%) e IAF asociadas al régimen hídrico del suelo y a los cultivares.

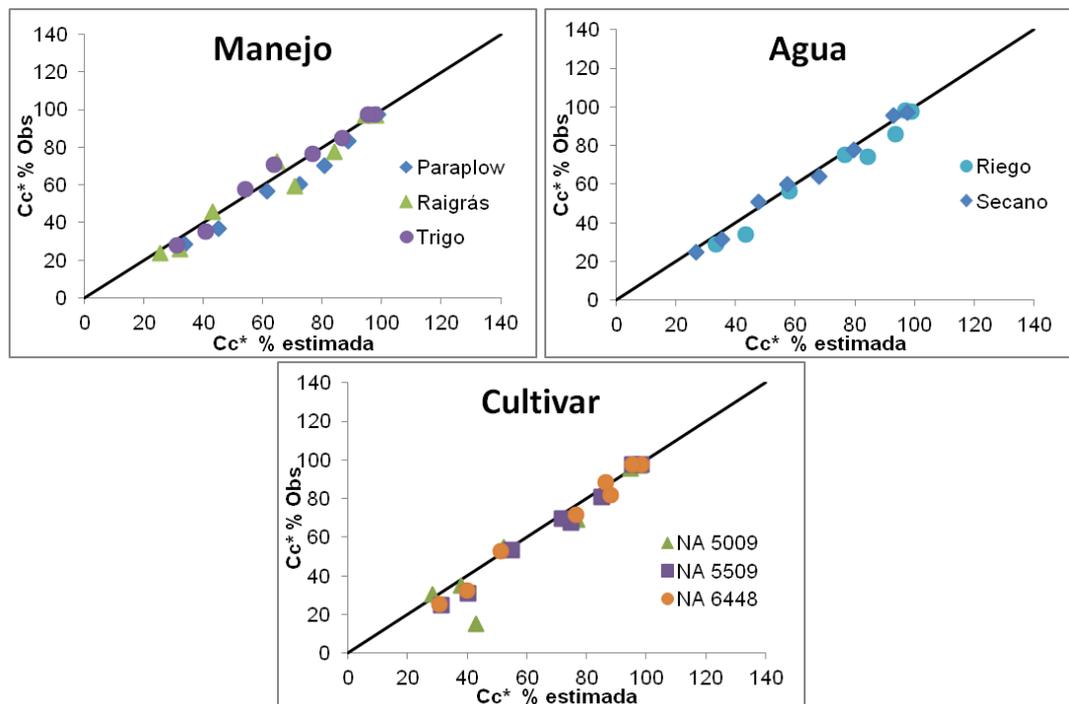


Figura 8. Cobertura del cultivo de soja en porcentaje de suelo cubierto observada ( $Cc^*$  % Obs) y cobertura estimada a partir IAF utilizando de la ecuación de Hsiao et al. (2009) ( $Cc^*$  % estimada), en diferentes momento del ciclo del cultivo. Manejo= manejo de suelo previo al cultivo de soja ( $\blacktriangle$  Raigrás= cobertura raigrás,  $\bullet$  Trigo= cobertura trigo,  $\blacklozenge$  Paraplow= laboreo con paraplow mas cobertura de trigo). Agua= régimen hídrico del suelo en el cultivo de soja ( $\bullet$  riego,  $\blacklozenge$  secano). Cultivar= cultivares de soja ( $\blacktriangle$  NA 5009,  $\blacksquare$  NA 5509,  $\bullet$  NA 6448).

### 3.8.3 Cobertura del cultivo bajo riego y secano

Los cultivares regados presentaron mayor cobertura (% de suelo cubierto) que el secano en la mayoría las fechas muestreadas, en riego se logró coberturas superiores al 90% a los 70 días después de la siembra. Bajo riego, el cultivo pudo mantener los valores óptimos de cobertura por más tiempo que el secano. En la etapa inicial del cultivo sin riego, la velocidad de crecimiento de las plantas fue menor que en las plantas con riego. Posteriormente, el cultivo bajo secano aumentó la velocidad de

crecimiento alcanzando la cobertura de las plantas con riego, a 80 días después de la siembra.

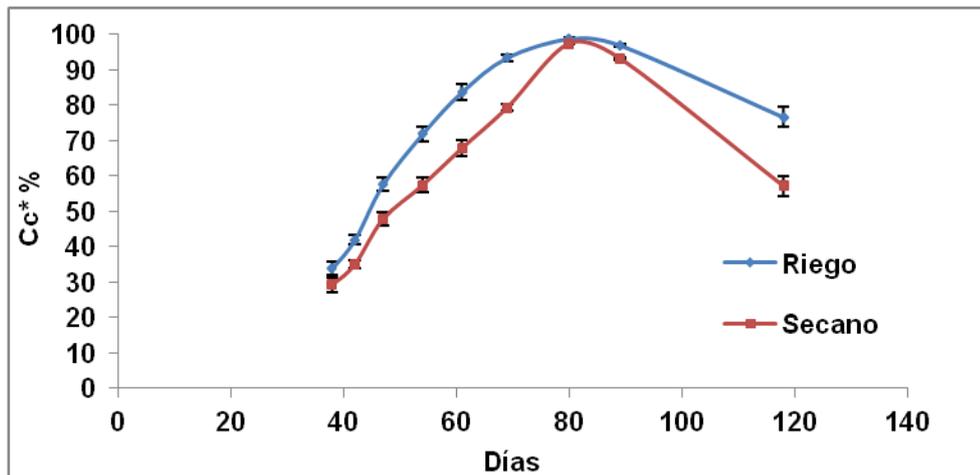


Figura 9. Evolución de la cobertura de la canopia en el cultivo de soja con riego (Riego) y sin riego (Secano). Cc\* %= porcentaje de suelo cubierto por la canopia. Días= Días después de la siembra. Barras corresponden a error estándar de la media, n= 18.

El contenido de agua del suelo repercutió directamente en la cobertura del cultivo. Los mecanismos de ajuste de la plantas en presencia de un estrés hídrico con la cobertura del cultivo, fueron citados por Hsiao et al. (2012). La expansión foliar, conductancia estomática y senescencia del dosel se ven afectados en respuesta a la escases del agua en el suelo. Cuando la planta logra equilibrar su estado hídrico, estos mecanismos de ajuste se revierten. Capurro et al. (2016) obtuvo resultados similares en IAF en respuesta a la variación del contenido de agua del suelo, en el cultivo de soja en la zona sur de Uruguay.

#### 3.8.4 Cobertura del cultivo según manejo de suelo

La evolución de la cobertura de la soja al inicio del desarrollo del cultivo fue diferente entre los manejos de suelo. Sin embargo las diferencias observadas en campo no lograron ser estadísticamente significativas (Figura 10). A partir de los 70 días después de la siembra, las diferencias observadas previamente entre los manejos no fueron visibles. La velocidad

en que el cultivo cubrió el suelo en la etapa inicial fue mayor en los manejos con paraplow y trigo respecto al manejo solo con raigrás. Esta diferencia, podría estar asociada a mejores condiciones hídricas del suelo como resultado de una mejora en la infiltración de agua, aumento del drenaje y pérdidas por evaporación (Martino, 1999), en los horizontes más superficiales que favorecieron el crecimiento de la cobertura en la etapa inicial. Para el caso del manejo con trigo, el crecimiento se podría asociar a mayor temperatura de suelo, debido a que fue el tratamiento con menor cobertura de suelo por problemas de implantación del trigo. Al momento de la siembra de la soja, el porcentaje de suelo cubierto por restos secos fue 20%, lo que pudo favorecer que el suelo se caliente antes que en los demás manejos. Ernst (1999) menciona que las diferencias en temperatura del suelo, se manifiestan en la mayor tasa de crecimiento del cultivo en el período inicial.

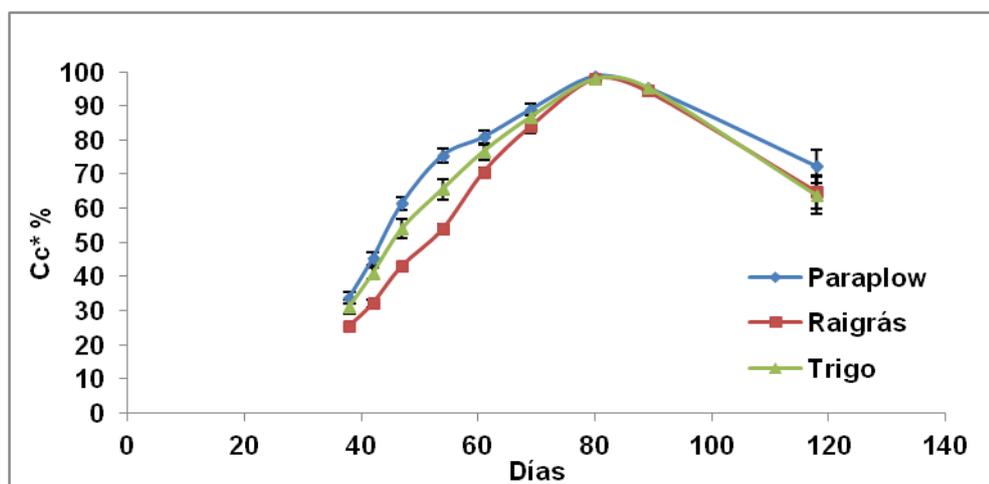


Figura 10. Evolución de la cobertura promedio de la canopia en el cultivo de soja en tres manejos de suelo previo. Trigo= cobertura de trigo. Raigrás= cobertura de raigrás. Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo. Cc\* %= porcentaje de suelo cubierto por la canopia. Días= días después de la siembra. Barras corresponden a error estándar de la media, n=12.

### 3.8.5 Cobertura del cultivo según cultivar

Se encontró diferencias significativas en cobertura al final de ciclo del cultivo entre cultivares. En todos los cultivares se observó una caída de la cobertura inmediatamente después que se alcanzaron los valores máximos de suelo cubierto. En el cultivar más precoz (NA5009) la disminución de la cobertura ocurrió a mayor velocidad que los demás.

No se observaron diferencias en la evolución inicial de la cobertura entre cultivares.

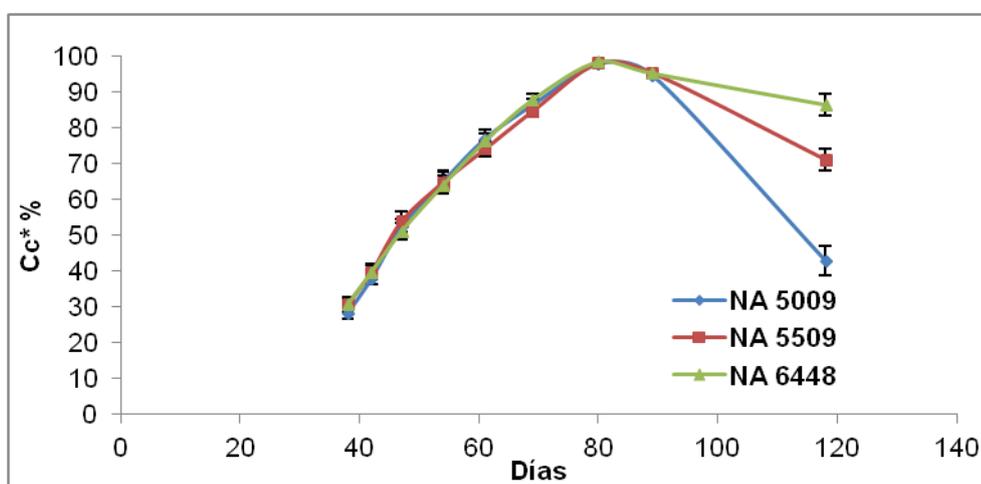


Figura 11. Evolución de la cobertura de la canopia en el cultivo de soja para tres cultivares (NA 5009, NA 5509, NA 6448). Cc\* %= porcentaje de suelo cubierto por la canopia. Días= Días después de la siembra. Barras corresponden a error estándar de la media, n=12.

La diferencia en la cobertura de la canopia observada entre cultivares, responden a la etapa de madurez en que se encuentra cada cultivar a los 120 días pos siembra. Según Baigorri et al. (2009), Kantolic (2008), Andriani (1991) la soja presenta una respuesta cuantitativa al fotoperíodo que junto a la temperatura determinan la duración de las fases de desarrollo del cultivo. Luego de la etapa juvenil, el cultivo es sensible al fotoperíodo durante el resto del ciclo, un fotoperíodo más corto acelera las fases de desarrollo luego de alcanzar el umbral en cada cultivar. La diferencia en el requerimiento fotoperiódico entre los cultivares, podría explicar las

diferencias en cobertura, en la medida que avanza la estación y los días tuvieron menor número de horas de luz.

### 3.8.6 Biomasa vegetal en el cultivo con y sin riego

La biomasa (MS kg ha<sup>-1</sup>) sobre la superficie del suelo fue mayor en las plantas bajo riego que en las plantas en secano en la mayoría de los muestreos realizados, pero solo fueron significativamente diferentes a los 120 días después de la siembra.

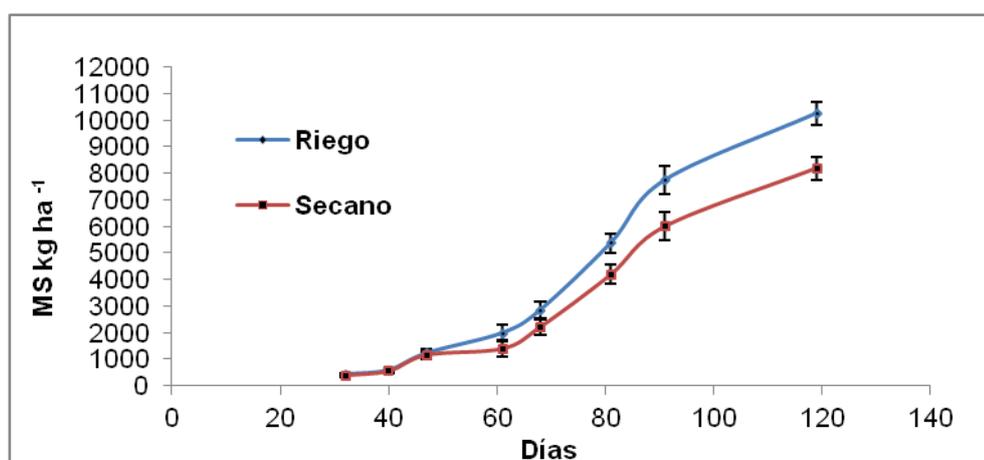


Figura 12. Evolución de la biomasa aérea de la soja con riego (Riego) y sin riego (Secano) (MS kg ha<sup>-1</sup>). Días= días después de la siembra. Barras corresponden a error estándar de la media, n= 18.

La diferencia en biomasa acumulada máxima fue de alrededor de 2000 kg ha<sup>-1</sup>, entre los tratamientos con y sin riego a los 120 días después de la siembra. Luego de 60 días después de la siembra, se registró mayor biomasa en el ambiente con riego hasta el final del cultivo. Esta diferencia en producción entre el riego y el secano se manifestó luego que se produjo un descenso del contenido de agua en el suelo, lo que afectó a los tratamientos sin riego. El estrés hídrico causa disminución de la transpiración del cultivo, causando reducciones en la producción de biomasa (Giménez y García, 2011, Hsiao et al., 2009). La biomasa total acumulada para los tratamientos sin limitantes hídricas fue de 10200 kg ha<sup>-1</sup> de materia seca. Otero et al. (2017) en ensayos similares en el mismo sitio experimental,

obtuvo diferencias en producción entre el riego y el seco (zafra 2014-2015) similares a las presentadas. Giménez, (2014) reporta valores semejantes en la (zafra 2009-2010) para cultivares de ciclo intermedio sin limitantes hídricas, pero no encontró diferencias en producción en biomasa acumulada entre el seco y el riego en un año con precipitaciones abundantes.

### 3.8.7 Biomasa vegetal en el cultivo según el manejo de suelo

Entre los diferentes manejos del suelo no se encontraron diferencias estadísticas en producción de biomasa ( $MS\ kg\ ha^{-1}$ ). En los manejos de trigo y paraplow, se observó mayor acumulación de MS que en raigrás durante todo el ciclo (figura 13).

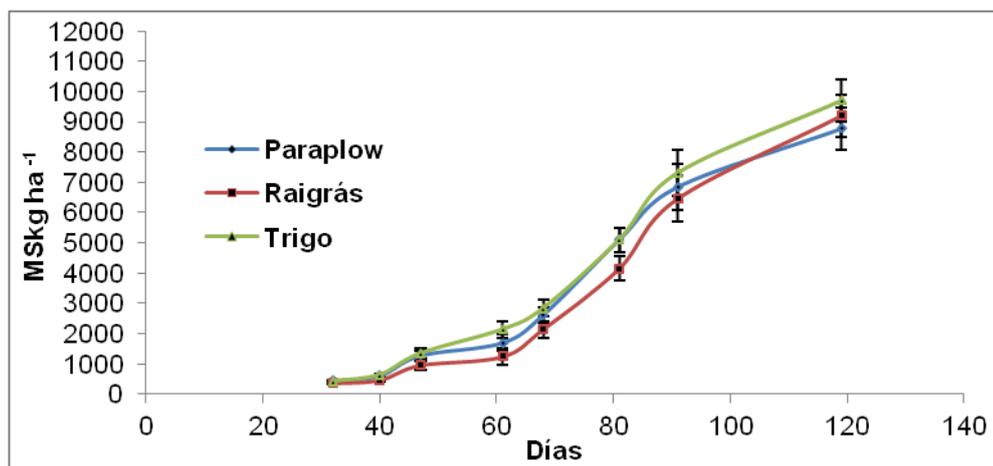


Figura 13. Evolución de la biomasa aérea sobre de la soja ( $MS\ kg\ ha^{-1}$ ), según el manejo previo del suelo. Trigo= cobertura de trigo. Raigrás= cobertura de raigrás. Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo. Días= días después de la siembra. Barras corresponden a error estándar de la media,  $n= 12$ .

El ambiente edáfico puede causar reducciones en la producción de los cultivos, como consecuencia de un menor aporte de nutrientes, restricciones en el desarrollo radicular y déficit hídricos (Letey, 1985). Según Ernst et al. (2019) la respuesta en la mejora de la productividad de los cultivos con paraplow es errática dependiendo fundamentalmente del efecto año y a la presencia de capas compactadas en el suelo, y agrega que es factible

esperar diferencias en productividad asociada a condiciones físicas del suelo en años con bajas precipitaciones.

La falta de respuesta consistente entre los diferentes manejos pudo deberse al efecto año (abundante precipitaciones), que no permitió que factores asociados al almacenamiento de agua establecieran diferencias respecto al riego, sumado a la buena condición inicial del suelo, sin compactación evidente.

### 3.8.8 Biomasa vegetal en el cultivo según el cultivar

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en biomasa aérea del cultivo a los 120 días después siembra entre los cultivares evaluados. Los cultivares NA 6448, NA 5509 presentaron mayor biomasa que el cultivar más precoz (NA 5009). La diferencia en biomasa acumulada responde a la diferencias en longitud del ciclo entre cultivares, mientras que el cultivar NA 5009 disminuye la velocidad de crecimiento en la medida que se acerca a las etapas de maduración, los demás cultivares continúan el creciendo a mayor tasa logrando la mayor producción en biomasa (Figura 14).

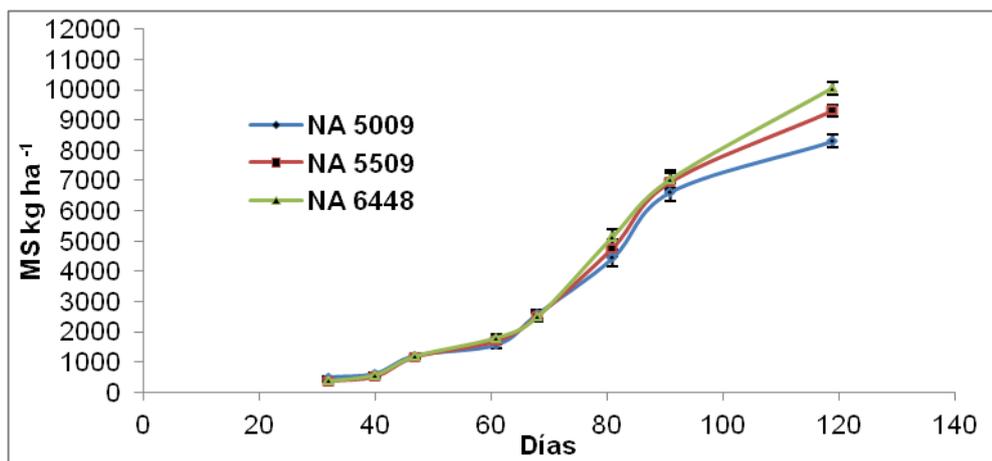


Figura 14. Evolución de la biomasa aérea del cultivo del soja (MS kg ha<sup>-1</sup>), según cultivar (NA 5009, NA 5509, NA 6448). Días= días después de la siembra. Barras corresponden a error estándar de la media, n=12.

Un cultivar de soja, dependiendo del tiempo que le lleva cumplir sus requerimientos de temperatura y fotoperíodo en una determinada latitud, se lo considera como de ciclo corto, medio o largo. Baigorri et al. (2009), y Fehr y Caviness (1977) destacan la importancia de la inducción floral y de la respuesta al fotoperíodo, en el inicio de la etapa reproductiva y en la duración del ciclo total, lo que determina el tiempo que dispone un cultivar para producir biomasa. En situaciones sin limitante hídrica, el rendimiento depende de la cantidad de biomasa producida y del índice de cosecha del cultivar. Los cultivares de mayor ciclo producen mayor biomasa, pero no necesariamente mayor rendimiento en grano (Baigorri, 2003).

#### 3.8.9 Rendimiento en granos y componentes del rendimiento

El análisis de la varianza de los tres factores evaluados (manejo previo del suelo, riego y cultivar), para las variables de rendimiento y sus componentes, permitió determinar la independencia de estos, ya que sus interacciones no fueron significativas. Esto nos habilita a poder comparar directamente entre cada uno de los factores (Balzarini et al., 2008). El cultivo bajo riego rindió más peso en granos ( $4407 \text{ kg ha}^{-1}$ ) que el cultivo en seco ( $3375 \text{ kg ha}^{-1}$ ) a través de todos los cultivares y manejos del suelo. Por otro lado, y a pesar de que los cultivares poseen ciclos parecidos, se evidenció que los cultivares relativamente más largos (NA 6448 y NA 5509) rindieron más que el cultivar más corto (NA 5009) en las condiciones de Salto. Bodrero (2003) menciona que los componentes de rendimiento en soja pueden ser modificados por factores genéticos, ambientales y de manejo, incidiendo en el rendimiento final. El manejo de suelo no afectó el rendimiento ni a sus componentes.

Cuadro 6. Efectos del manejo del suelo previo a la siembra, el régimen hídrico y el cultivar en el rendimiento en granos y en los componentes del rendimiento en el cultivo de soja.

Manejo	Agua	Cultivar	Vainas (N° m <sup>-2</sup> )	Granos (N° m <sup>-2</sup> )	P.S. 1000 Granos (g)	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa (MS kg ha <sup>-1</sup> )
Paraplow			1398 ns	2976 ns	144,5 ns	3891 ns	8765 ns
Raigrás			1493	3270	145,1	3859	9196
Trigo			1493	3248	142,2	3924	9698
	Riego		1609 ns	3540 a	145,3 ns	4407 a	10249 a
	Secano		1313	2787 b	142,6	3375 b	8190 b
		NA 5009	1411 ns	2637 b	148,7 a	3416 c	8305 b
		NA 5509	1361	3165 ab	142,1 b	3758 b	9303 a
		NA 6448	1612	3691 a	141,1 b	4499 a	10051 a

Medias en las columnas seguidas de diferentes letras son significativamente distintas por el Test de Tukey ( $p < 0,05$ ), ns= sin significancia estadística. Manejo= manejo previo del suelo (Trigo= cobertura de trigo, Raigrás= cobertura de raigrás, Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo). Agua= régimen hídrico (Riego, Secano). Cultivar= cultivares de soja (NA 5009, NA 5509, NA 6448). P. S. 1000= peso seco de 1000 granos.

El cultivo bajo riego obtuvo mayor biomasa aérea y mayor rendimiento en granos (kg ha<sup>-1</sup>), este aumento del rendimiento responde principalmente a aumentos del número de granos por m<sup>-2</sup>. La relación entre el rendimiento y el número de granos por m<sup>-2</sup> fue relativamente alta ( $r^2 = 0,89$ ). Durante el período comprendido entre R4 y R6 (período crítico), se define el número de granos y el peso de los granos por unidad de superficie. El componente de mayor contribución en el rendimiento de granos es el número de granos. Cualquier factor que afecte el crecimiento del cultivo en este período provocara reducción en el rendimiento, (Giménez 2014, Álvarez 2010, Andriani 1991, Fehr y Caviness 1971). En el experimento se observó mayor número de vainas por unidad de superficie, en los tratamientos regados,

pero esta diferencia observada no alcanzó a ser estadísticamente significativa. El peso de los granos no fue alterado por el régimen hídrico.

El riego, al evitar períodos de estrés hídrico, permitió un mayor potencial de rendimiento que el seco, coincidiendo con lo reportado por Fassio et al. (2016), Giménez et al. (2014), Terra (2013). A pesar de que fue un año con precipitaciones abundantes, durante el cultivo en seco, se observaron tres períodos de déficit hídricos bien marcados (antes de floración, en elongación de vainas y llenado de granos). La respuesta del rendimiento causada por el riego fue de 30 % superior al seco. Existen reportes en Uruguay en condiciones experimentales de respuestas superiores a las encontradas (Giménez et al., 2014, Fassio et al., 2016), estos mismos autores manifiestan que la respuesta al riego en el cultivo de soja es variable, según las condiciones ambientales de cada año. El peso de granos no explicó aumentos en el rendimiento ( $r^2 = 0,12$ ), el  $r^2$  presentando es bastante menor a valores ( $r^2 = 0,31$ ), reportado por Villasuso (2015). El peso de los granos depende de la tasa de crecimiento y de la duración del llenado. El peso del grano está gobernado genéticamente, pero puede ser modificado por condiciones ambientales (Kantolic et al., 2004), como la disponibilidad de agua y la radiación.

La diferencia en el rendimiento entre los cultivares, se relacionó positivamente a la biomasa aérea acumulada ( $r^2 = 0,91$ ), de los diferentes cultivares y al número de granos que lograron por unidad de área ( $r^2 = 0,95$ ). El aumento en el número de granos por  $m^2$  estuvo explicado por la combinación en el número de vainas y el número de granos por vainas que logró llenar cada cultivar (1,3; 2,3; 2,3 para NA 5009, NA5509, NA6448 respectivamente. Según Ovando et al. (2017), Kantolic (2008), Giorda y Baigorri (1997), Mandl (1994), en la siembra, se define el rendimiento potencial de un genotipo en un ambiente determinado. Cada cultivar tiene requerimientos específicos de temperatura y fotoperíodo que definen la inducción floral y largo de los estados fenológicos posteriores a la floración.

La interacción del largo del ciclo del cultivar con condiciones ambientales desde R3 a R6 resultó en diferencias en el rendimiento. El rendimiento se relacionó positivamente con la extensión del ciclo de cada cultivar difiriendo con los resultados encontrados por Fassio et al. (2016) en el sur de Uruguay, donde el rendimiento no se asoció a la longitud del ciclo. Ceretta y Vilaro (2002), Baigorri (2003), Kantolic (2008) afirman que no existe una relación directa y positiva entre la longitud del ciclo y el rendimiento potencial. Kantolic (2008) agrega además que en las zonas templadas, en general los cultivares de ciclo más largo tienden a rendir menos que cultivares de menor ciclo, asociado a un menor índice de cosecha.

El peso del grano fue mayor en el cultivar que presentó menor cantidad de granos por m<sup>2</sup> (NA 5009). El cultivo soja tiene la capacidad de compensar en parte las reducciones en un componente del rendimiento, causadas por estrés, aumentando el componente subsiguiente, una vez desaparecido el estrés (Morandi, et al., 1991, Andriani y Bodrero, 1995 citados por Bodrero, 2003). El cultivar (NA 5009) presentó mayor peso de los granos a causa de menor concreción de granos por unidad de área.

### 3.9 CALIBRACION DEL MODELO

#### 3.9.1 Parámetros calibrados para el cultivo de soja

Los parámetros de entrada conservativos fueron calibrados, tomados de la bibliografía o estimados en base a resultados obtenidos en campo. Los parámetros no conservativos fueron registrados en campo o tomados en base a la bibliografía (Cuadro 7). Los parámetros conservativos son similares a los citados por Montoya et al. (2017), Raes et al. (2017), Giménez et al. (2017), Abi Saab et al. (2014).

Cuadro 7. Parámetros de entrada del modelo Aquacrop calibrados.

Símbolo	Fenología y características del cultivo	Tipo	Valor	Origen
T base	Temperatura base	1	5	r
T superior	Temperatura superior	1	30	r
Desarrollo de la canopia				
CC0	Cobertura inicial de la canopia	1	1,90	e
	Número de planta por hectáreas	2	380000	m
	Tiempo de siembra a emergencia (días)	2	7	m
CGC	Coefficiente de crecimiento de la canopia	1	9,1	c
CCx	Máxima cobertura alcanzada	2	99	m
	Tiempo de siembra a comienzo de senescencia	2	112	m
Floración				
	Tiempo de siembra a floración	2	59	m
	Duración de la floración	2	25	m
Desarrollo radicular				
Zn	mínima profundidad radicular (m)	2	0,2	m
Zx	Máxima profundidad efectiva radicular	2	0,60	m
Traspiración del cultivo				
Kctrx	Coefficiente de traspiración del cultivo	1	1,1	r
Productividad del agua				
WP*	productividad de agua normalizada por ETo y CO <sub>2</sub> (g .m <sup>-2</sup> )	1	15	r
índice de cosecha				
Hio	índice de cosecha de referencia	2	45	e
	Posibilidad de incremento Hio por estrés antes de la floración	1	chico	r
	Coefficiente que describe el impacto de restricción del Crecimiento vegetativo en la formación del rendimiento	1	nulo	r
	Coefficiente que describe el impacto negativo del cierre de estomas en la formación del rendimiento	1	fuerte	r
	Incremento máximo del índice de cosecha especificado	1	10	r
Estrés hídrico				
Pexp ,lower	Umbral superior expansión de la canopia	1	0,18	c-r
Pexp ,upper	Unbral inferior expansión de la canopia	1	0,65	c-r
	Factor de curvatura para la expansión de la canopia	1	3	c-r
Psto	Umbral superior para la regulación estomática	1	0,55	c-r
	Factor de curvatura para el control estomático	1	3	c-r
P sen	Umbral superior para senescencia	1	0,7	c-r
	Factor de curvatura para senescencia	1	3	c-r
P pol	Umbral superior para fallas en polinización	1	0,80	c-r

\*(c) calibrado, (r) extraído de la bibliografía, (e) estimado, (m) medido en campo.

### 3.9.2 Cobertura de la canopia, Biomasa aérea y Rendimiento en granos para el escenario de riego y seco

A los efectos del ajuste inicial del modelo, se utilizaron los datos de cobertura, de biomasa aérea y de rendimiento del cultivar (NA 6448), en el manejo previo de suelo con paraplow con y sin riego.

El modelo Aquacrop simula con buena precisión la evolución de la cobertura verde de la canopia especialmente en el cultivo con riego, respecto a los datos observados en los diferentes muestreos (Figura 15). En los tratamientos bajo riego, se obtuvo mejor ajuste de la cobertura del cultivo que en seco. Este mejor ajuste en condiciones sin limitantes hídricas responde al procedimiento de calibración del modelo. Para calibrar se parte del ajuste de la evolución de la cobertura en condiciones óptimas (Steduto et al., 2012) y luego a través del cambio en los diferentes parámetros (Raes et al., 2009), se va limitando el crecimiento foliar hasta llegar a simular el crecimiento en las condiciones propias de cada situación con restricciones de agua.

En seco los valores simulados en cobertura en el intervalo comprendido entre los 60 y 80 días después de la siembra, se ubican por debajo de los valores observados. Coincidiendo con un período de estrés que afectó el cultivo a partir de los 50 días y finalizó después de los 70 días. Montoya et al. (2017), Giménez et al. (2017) reportan menor cobertura estimada del cultivo de soja en condiciones con déficit hídrico severo que la observada en el campo. De la Casa (2011), observa dificultades en la simulación de la cobertura de la canopia con el modelo cuando las condiciones hídricas son limitantes en maíz. Según Steduto et al. (2009), una mala estimación de la cobertura ocasionará malas estimaciones de las demás variables por la lógica de funcionamiento del modelo.

La biomasa aérea acumulada simulada por el modelo en la etapa inicial y final (Figura 15), concuerda con los valores obtenidos en campo. La biomasa total acumulada estimada por el modelo fue 495 MS kg ha<sup>-1</sup>

superior a la real bajo riego y 242 MS kg ha<sup>-1</sup> inferior a la observada en seco. Entre 60 y 80 días se observó mayor diferencia entre valores observados y simulados por el modelo. Esta diferencia responde a la variación de los resultados obtenidos en campo en esta variable y sobreestimación del modelo al inicio de la etapa de crecimiento lineal del cultivo. La sobreestimación es causada por características propias del modelo, si bien es un modelo que simula muy bien el rendimiento de los cultivos herbáceos (Steduto et al., 2012), no es un modelo específico para la soja. La respuesta del crecimiento del cultivo de soja frente a variaciones en el contenido de agua del suelo reportadas por Capurro et al. (2016), dificultan la simulación en condiciones cuando el contenido de agua del suelo experimenta fluctuaciones importantes al correr de la estación de crecimiento.

Para la evolución del rendimiento en granos se alcanzaron los valores objetivos en los indicadores de bondad de ajuste (Coeficiente de determinación ( $r = 80\%$ ), Raíz Cuadrada del Cuadrado Medio del Error Normalizado (NRMSE =  $15\%$ ), Eficiencia del Modelo, Nash-Sutcliffe (EF= $60\%$ ), Índice de Concordancia Willmott's ( $d=80\%$ ) sugeridos por Raes et al. (2017). Se obtuvo una buena representación en el rendimiento en granos a cosecha. La diferencia entre el rendimiento en granos estimado y observado fue de 35 y 344 kg ha<sup>-1</sup> en riego y seco respectivamente. Se encontraron discrepancias importantes entre valores simulados y observados en determinaciones previas a la cosecha. La dificultad para el seguimiento de esta variable en el campo (correcto muestreo en función del aumento de la variabilidad espacial del seco) y la falta de sensibilidad del modelo a los cambios de etapas fenológicas frente a eventos de estrés son causas de menor ajuste.

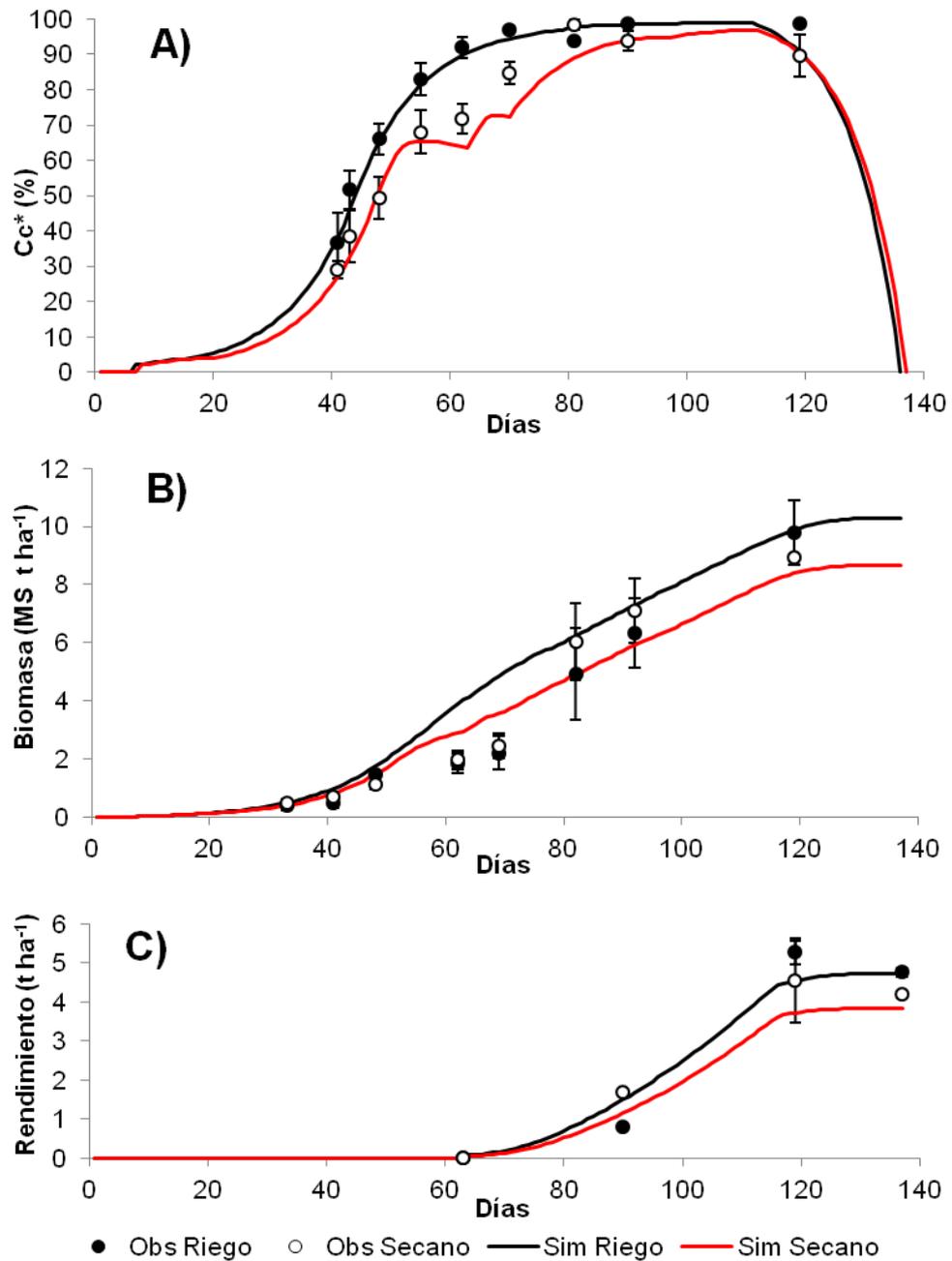


Figura 15. Valores observados (● Obs Riego= observados con riego, ○ Obs Secano= observados sin riego) y valores simulados (— Sim Riego= simulado con riego, — Sim Secano= simulado sin riego) con el modelo Aquacrop para el cultivar de soja NA 6448. A) Cobertura de la canopia,  $Cc^*$  (%)= porcentaje de suelo cubierto por la canopia. B) Biomasa aérea (MS t. ha<sup>-1</sup>). C) Rendimiento (t ha<sup>-1</sup>).

Rendimiento de granos secos ( $t\ ha^{-1}$ ). Días= días desde la siembra. Barras corresponden a desvío estándar,  $n=18$ .

### 3.9.3 Simulación del contenido de agua del suelo con y sin riego

Se observó buena concordancia entre los valores observados y simulados en el contenido diario de agua en el suelo a la profundidad radicular (Figura 16). El contenido de agua simulado se aproxima más a los valores observados luego que el cultivo logró alcanzar la cobertura máxima del suelo. Probablemente por menor precisión alcanzada en la estimación de la evaporación del suelo por el modelo Aquacrop. Montoya (2013), reportó posibles dificultades en el modelo para la estimación de la evapotranspiración en cultivo de papa.

En seco, se observa un buen ajuste entre los valores del contenido de agua simulado y el observado. Se identifican algunos períodos puntuales con diferencias notorias entre los valores observados y los estimados entre los 40 y 70 días pos siembra (Figura 17).

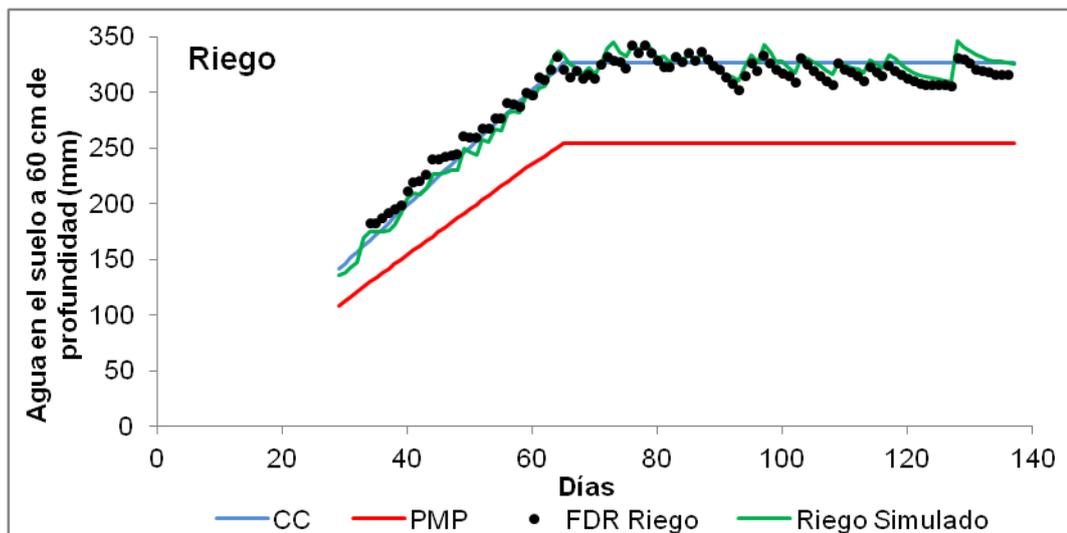


Figura 16. Evolución del contenido de agua en el suelo para el cultivar de soja NA 6448 con riego. • FDR Riego= valores observados registrados con sensores FDR (mm). –Riego Simulado= valores estimados por el modelo

Aquacrop (mm). –CC= contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (mm), –PMP= contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente (mm). Días= días después de siembra.

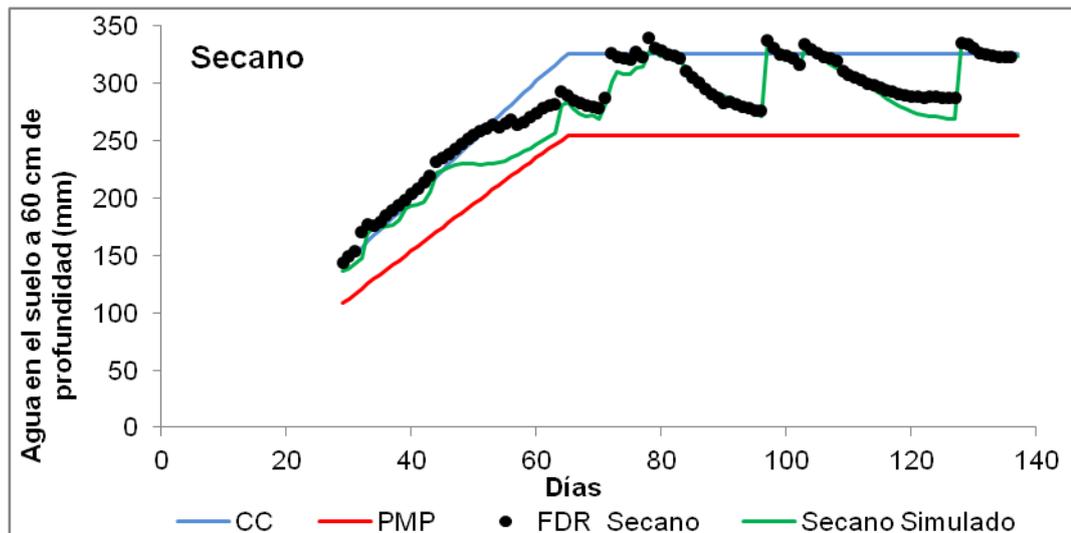


Figura 17. Evolución del contenido de agua en el suelo para el cultivar de soja NA 6448 sin riego. • FDR Secano= valores observados registrados con sensores FDR (mm). –Secano Simulado= valores estimados por el modelo Aquacrop (mm). –CC= contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (mm). –PMP= volumen de agua en el suelo a punto de marchitez permanente (mm). Días= días después de siembra.

#### 3.9.4 Pruebas de Bondad de ajuste del modelo con y sin riego

Los valores de los indicadores del desempeño del modelo son satisfactorios (Cuadro 8). Se alcanzó el umbral objetivo en cada indicador en la mayoría de las variables ajustadas: a) coeficiente de determinación ( $r^2$ ) superior al 0,80, b) raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizada (NRMSE) inferior al 15%, c) eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) mayor a 0,60%), d) índice de concordancia de Willmott's mayor a 0,80. El parámetro con mayor ajuste entre valores observados y estimados fue la cobertura de la canopia bajo riego, obteniéndose 6,07; 0,95; 0,98 para NRMSE, EF y d respectivamente.

Por otro lado, el peor ajuste se obtuvo con la biomasa aérea en el cultivo regado. Sin embargo tanto en la eficiencia del modelo (0,81) como en el índice de concordancia (0,91) se alcanzaron los valores objetivos. La raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado (37,59) fue el índice que presentó mayores diferencias entre los valores de las variables observadas y estimadas.

Los indicadores estadísticos utilizados para evaluar el desempeño del modelo en las variables biomasa, cobertura, rendimiento en granos y contenido de agua en el suelo, son semejantes a los presentados por Montoya et al. (2017) y Abi Saab et al. (2014) para la calibración y validación en un cultivo de soja. En el contenido de agua en el suelo se obtuvo valores de ajuste equivalentes a los reportados por Giménez et al. (2017).

El modelo logra representar muy bien las variables consideradas en los dos regímenes hídricos (Cuadro 8).

Cuadro 8. Pruebas de desempeño del modelo para valores estimados por el modelo Aquacrop y valores observados en el cultivar de soja NA 6448 en dos regímenes hídricos: con riego (Riego) y sin riego (Secano).

		n	r <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	EF	d
Cobertura	Riego	9	0,98	4,84	6,07	0,95	0,98
	Secano	9	0,96	6,31	9,10	0,93	0,96
Biomasa	Riego	8	0,92	1,29	37,59	0,81	0,91
	Secano	8	0,95	0,77	21,37	0,93	0,96
Rendimiento	Riego	4	0,97	0,35	12,89	0,95	0,97
	Secano	4	0,99	0,22	8,45	0,97	0,98
Agua	Riego	63	0,81	11,22	3,44	0,80	0,89
	Secano	63	0,92	17,33	5,60	0,88	0,95

Cobertura= cobertura de la canopia en porcentaje de suelo cubierto.

Biomasa= materia seca del cultivo sobre el suelo. Rendimiento=

rendimientos en granos cosechados. Agua= contenido de agua en el suelo.

n= número de observaciones. r<sup>2</sup>= coeficiente de determinación. EF=

eficiencia del modelo, RMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error. NRMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado. d= índice de concordancia de Willmott's.

### 3.10 DESEMPEÑO DEL MODELO SEGÚN MANEJO DE SUELO

#### 3.10.1 Parámetros iniciales: Cobertura de la canopia, Biomasa aérea y Rendimiento en granos en el cultivo según manejo

Según Raes et al. (2017) el modelo tendría la capacidad de representar diferentes situaciones de manejo de suelo. No obstante, los valores simulados en cobertura, biomasa y rendimiento en granos no presentaron variaciones entre los diferentes manejos. No se observó sensibilidad del modelo cuando se modificó la distribución radicular y el porcentaje de suelo cubierto por restos secos en la siembra.

AquaCrop usa el agua transpirada para estimar la biomasa, lo que hace que las variables estimadas tengan gran dependencia con la disponibilidad de agua en el suelo para el cultivo (Steduto et al., 2009). La disponibilidad de agua no fue suficientemente distinta entre cada manejo simulado como para crear diferencias en las variables consideradas. De la Casa (2011) reportó diferencias en la cobertura de la canopia en el cultivo de maíz, al alterar el agua que dispone el cultivo en el suelo. De Oliveira (2018) trabajando con cultivo de maíz concluye que los parámetros con mayor incidencia en el desempeño del modelo son el coeficiente de transpiración del cultivo ( $K_{ctr,x}$ ), el índice de cosecha de referencia ( $H_{lo}$ ) y la productividad del agua normalizada ( $WP^*$ ), en cambio los parámetros asociados al sistema radicular y cobertura del suelo con restos secos presentan muy baja sensibilidad en el modelo.

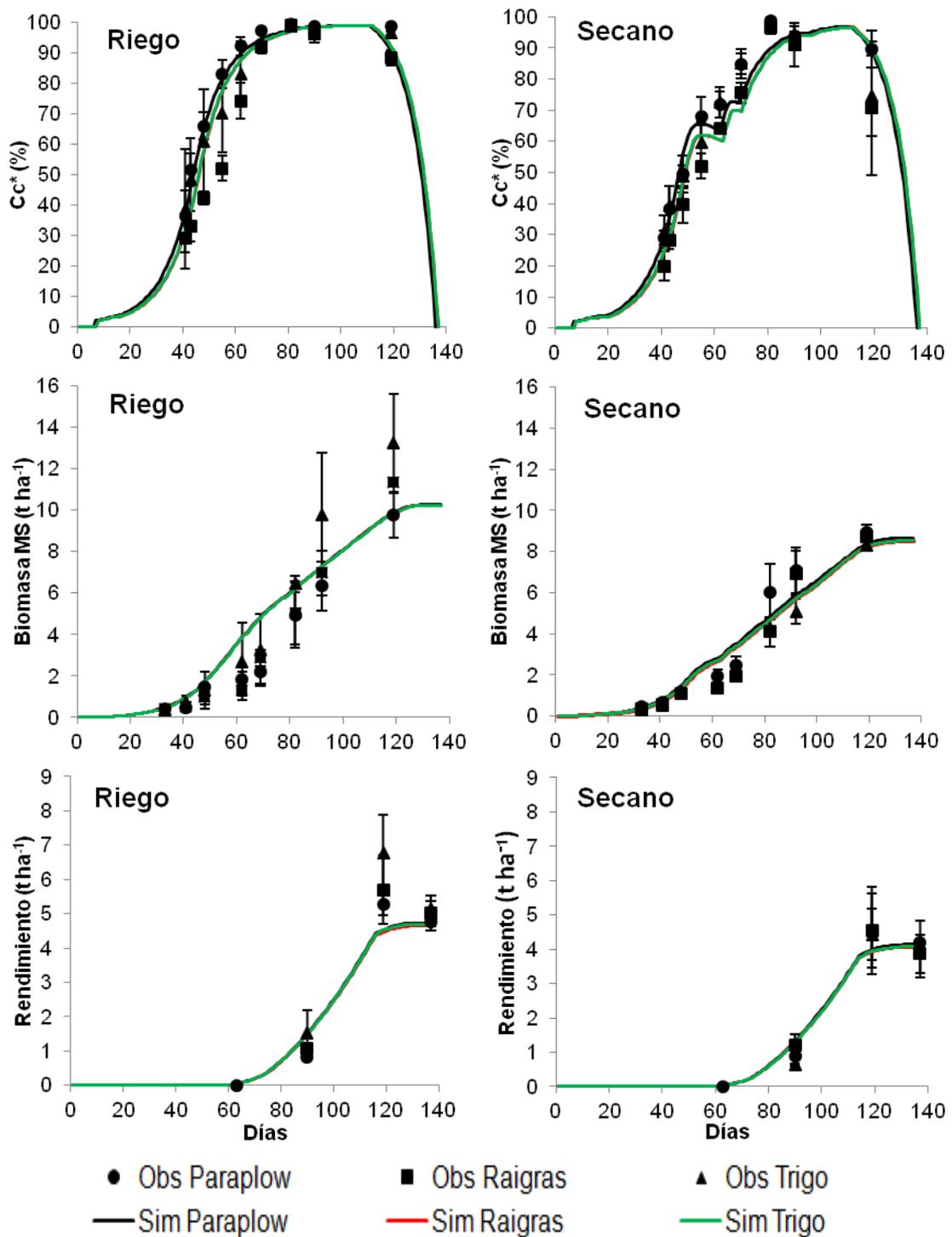


Figura 18. Valores observados y simulados con el modelo Aquacrop para el cultivo de soja en tres manejos de suelo previo a la siembra. Riego= con riego. Secano= sin riego. ● Obs Paraplow= valores observado en el cultivo

de soja con laboreo de paraplow y cobertura de trigo. ▲ Obs Trigo= valores observados en el cultivo de soja con cobertura de trigo previa. ■ Obs Raigras= valores observados en el cultivo de soja con cobertura de raigrás previa. –Sim Raigrás, – Sim Trigo, – Sim Paralow corresponden a valores simulados para cada manejo. Cc\* (%)= cobertura del suelo por la canopia (%). Días= días desde la siembra. Las barras corresponden al desvío estándar, n=12.

### 3.10.2 Simulación del Contenido de agua del suelo según manejo con y sin riego

La evolución del contenido de agua en el suelo no fue diferente entre los tres manejos previos a la siembra en ninguno de los regímenes hídricos.

En el cultivo bajo riego, las diferencias mínimas observadas en la evolución del contenido de agua en el suelo entre los tres manejos del suelo, podrían estar influenciadas por el alto valor del umbral de riego ( $p= 30\%$ ) utilizado, y por la frecuencia de las precipitaciones ocurridas en la estación de crecimiento.

Siri y Ernst (2011) reportan cambios en el contenido de agua en el suelo por presencia de restos secos en cobertura. En seco, no se registraron cambios en el contenido de agua en el suelo al variar la cantidad de restos secos en cobertura sobre el suelo previo a la siembra.

El manejo con paraplow presentó una pequeña superioridad en el contenido de agua en el suelo respecto a los demás manejos. Según los resultados presentados anteriormente no se alteró la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Todo parece indicar que se logró captar más agua de lluvia en este manejo a través de mejora de la infiltración como reportada por Martino (1998).

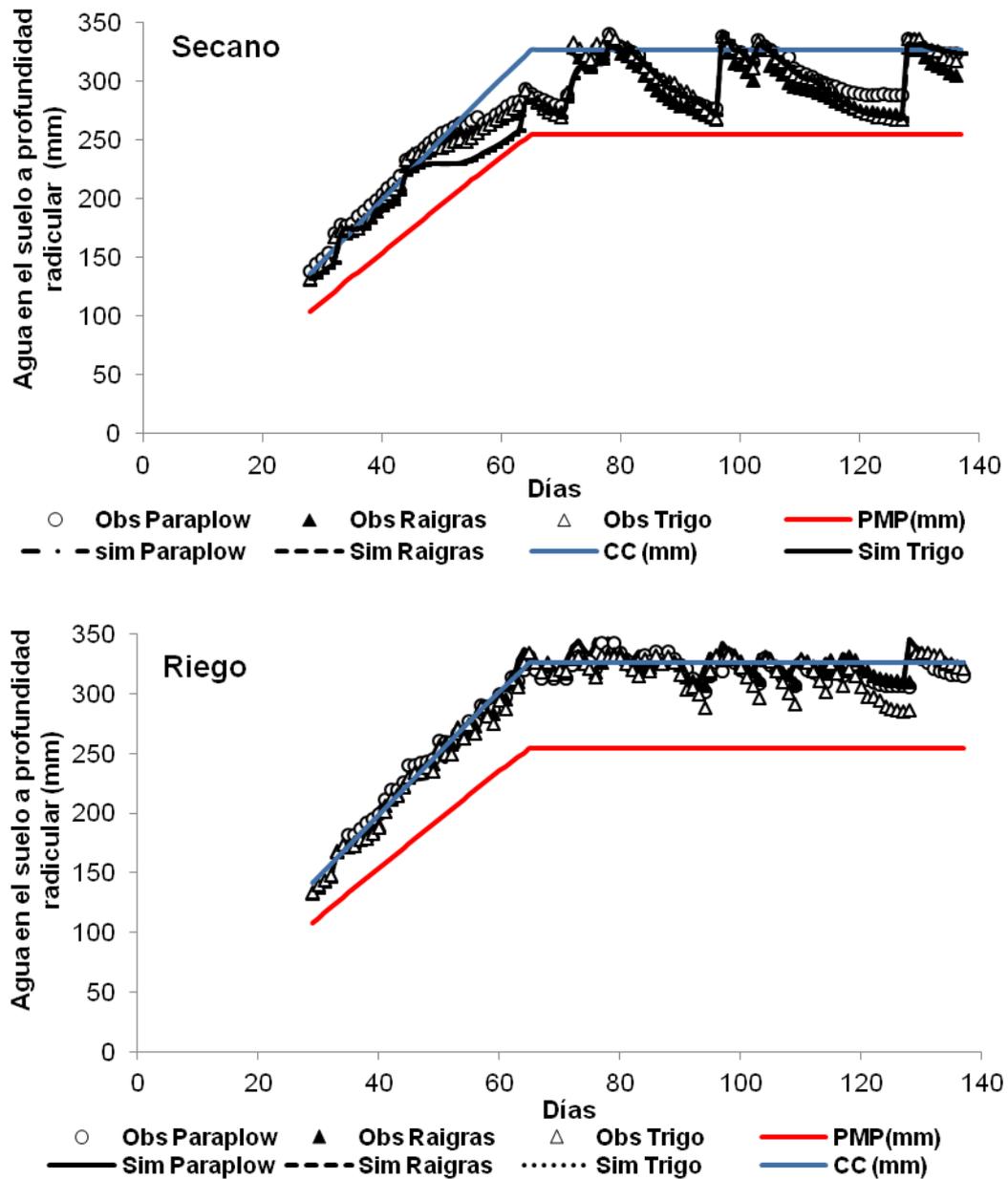


Figura 19. Evolución del contenido de agua en el suelo en el cultivo de soja según manejo previo de suelo (medido con sensores FDR). Riego= con riego. Secano= sin riego. ○ Obs Paraplow= valores observados en el manejo de laboreo con paraplow y cobertura de trigo. △ Obs Trigo= valores observados en cobertura de trigo. ▲ Obs Raigrás= valores observados en cobertura de raigrás. Sim Paraplow, Sim Raigrás, Sim Trigo= valores

simulados con el modelo Aquacrop para cada manejo previo de suelo. Días= días desde la siembra.

### 3.10.3 Pruebas de desempeño del modelo según manejo del suelo

Se lograron valores aceptables de desempeño del modelo en el ajuste de los parámetros en los diferentes manejos (Cuadro 9). El modelo no fue sensible en captar las diferencias entre los tres manejos de suelo al incorporar variaciones en la distribución radicular y en el porcentaje de suelo cubierto por restos vegetales en la siembra del cultivo.

La dispersión entre los índices estadísticos ( $R^2$ , RMSE, NRMSE, EF, y d) se debe más a la variabilidad de la variable observada en el campo, que a la variable simulada. El rendimiento del modelo presenta los mejores resultados en el manejo con paraplow, lo que es lógico porque fue el manejo utilizado para la calibración.

Los resultados más pobres en el rendimiento del modelo se observaron con el contenido de agua en el suelo bajo riego. Los valores de desempeño en el manejo de raigrás (NRMSE= 4,38 EF= 0,44 d= 0,80) y en el trigo sin paraplow (NRMSE= 10,55 EF= 0,31 d= 0,61) presentaron un pobre desempeño. En la eficiencia del modelo (EF) e índice de concordancia (d) el modelo no se alcanzó los valores objetivos de ajuste.

En seco, los valores de los índices de desempeño entre los tres manejos en el contenido de agua en el suelo fueron muy parecidos entre sí.

Cuadro 9. Pruebas de desempeño del modelo para los valores estimados por el modelo Aquacrop y para valores observados en el cultivo de soja (NA 6448) con diferentes manejos de suelo previo a la siembra.

	MANEJO	n	RIEGO					SECANO				
			R2	RMSE	NRMSE	EF	d	R2	RMSE	NRMSE	EF	d
Cobertura	PARALOW	4	0,98	4,84	6,07	0,95	0,98	0,96	6,31	9,10	0,93	0,96
	RIGRAS	4	0,91	11,06	16,42	0,83	0,91	0,90	8,55	14,30	0,89	0,94
	TRIGO	4	0,97	5,30	6,94	0,94	0,97	0,86	9,82	14,63	0,81	0,91
Biomasa	PARALOW	2	0,92	1,29	37,59	0,81	0,91	0,95	0,77	21,37	0,93	0,96
	RIGRAS	2	0,90	1,25	33,79	0,87	0,92	0,93	0,82	26,12	0,91	0,95
	TRIGO	2	0,92	1,76	37,11	0,82	0,88	0,98	0,57	19,33	0,95	0,97
Rendimiento	PARALOW	3	0,97	0,35	12,89	0,95	0,97	0,99	0,22	8,45	0,97	0,98
	RIGRAS	3	0,98	0,54	23,06	0,91	0,95	0,98	0,22	11,22	0,98	0,99
	TRIGO	3	0,95	0,87	32,31	0,82	0,89	0,97	0,28	15,23	0,97	0,98
Agua	PARALOW	63	0,81	11,22	3,44	0,80	0,89	0,92	17,33	5,60	0,88	0,95
	RIGRAS	63	0,75	14,23	4,38	0,44	0,80	0,91	18,78	6,07	0,86	0,94
	TRIGO	63	0,76	33,48	10,55	0,31	0,61	0,96	13,42	4,40	0,95	0,97

RIEGO= con riego. SECANO= sin riego. Cobertura= cobertura de la canopia en porcentaje de suelo cubierto. Biomasa= materia seca del cultivo sobre el suelo. Rendimiento= rendimientos en granos cosechados. Agua= contenido de agua en el suelo. TRIGO= cobertura de trigo. RAIGRÁS= cobertura de raigrás. PARAPLOW= laboreo con paraplow más cobertura de trigo. n= número de observaciones,  $r^2$ = coeficiente de determinación, EF= eficiencia del modelo, RMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error, NRMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado, d= índice de concordancia de Willmott's.

### 3.11 DESEMPEÑO DEL MODELO SEGÚN CULTIVAR

#### 3.11.1 Resultados observados y simulados en el cultivo según cada cultivar

La evolución de la cobertura simulada se diferencia entre los tres cultivares en la etapa final como resultado del comienzo de la senescencia. En el cultivo bajo riego, la cobertura simulada fue similar a la observada en el campo para cada cultivar. Por otro lado, el cultivo en secano se observó

una sobreestimación de la cobertura en los cultivares NA5009 y NA5509, en particular en la etapa de senescencia del cultivo.

En biomasa total acumulada del cultivo en R6 fue satisfactoriamente representada por el modelo, tanto en riego como en seco. La biomasa producida fue mayor cuanto más largo fue el ciclo del cultivo. La precisión en la estimación de la cobertura del cultivo es fundamental para la precisión de la estimación de la transpiración y de la producción en biomasa (Raes et al. 2009). Un cultivo de mayor ciclo tendrá mayor transpiración (García y Giménez 2011). El modelo discrimina satisfactoriamente la producción en biomasa en cada cultivar por la longitud del ciclo.

Se observó mejor concordancia entre los valores estimados y los observados del rendimiento en granos de los tres cultivares, en el cultivo con riego respecto al cultivo en seco. La producción en granos se sobrestimó en 738 kg ha<sup>-1</sup> para el cultivar NA 5009 y en 300 kg ha<sup>-1</sup> para NA 5509 y, se subestimó en 344 kg ha<sup>-1</sup> para el cultivar NA6448 en ausencia del riego. El modelo no tiene en cuenta plagas, enfermedad y características propias de cada cultivar (Reas et al., 2017), a excepción de la longitud del período de crecimiento. En este estudio, se buscó un máximo control del efecto limitante del rendimiento de las plagas y enfermedades. El efecto genético asociado al ciclo entre cultivares fue considerado solamente a través del tiempo entre cada fase fenológica.

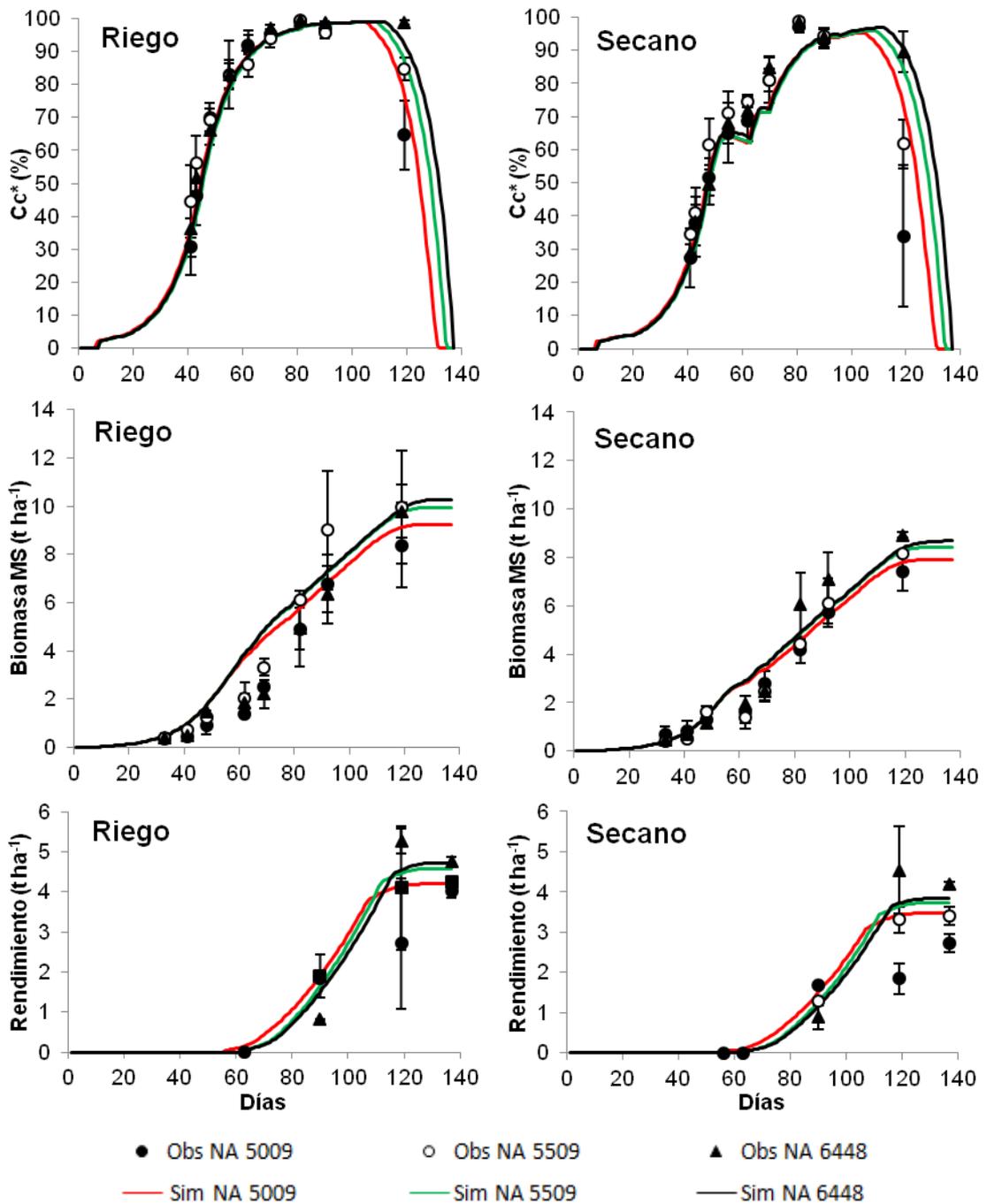


Figura 20. Valores observados y simulados con el modelo Aquacrop para tres cultivares de soja. Riego= con riego. Secano= sin riego. ● Obs NA 5009= valores observados en el cultivar NA 5009. ▲ Obs NA 6448= valores observados en el cultivar NA 6448. ○ Obs NA 5509= valores observados en

el cultivar NA 5509. -Sim NA 5009, - Sim NA 5509, - Sim NA 6448 corresponden a valores simulados para cada cultivar.  $Cc^*$  (%)= cobertura de la canopia en porcentaje de suelo cubierto. Días= días desde la siembra. Las barras corresponden al desvió estándar,  $n=12$ .

### 3.11.2 Desempeño del modelo según el cultivar

El desempeño del modelo fue satisfactorio en general simulando el comportamiento de los tres cultivares (Cuadro 10). La cobertura de la canopia en los cultivares bajo riego presentó el mejor ajuste. Por otro lado, en seco, los valores de los índices de desempeño muestran un débil ajuste en el cultivar NA 5009 (NRMSE=24,74 EF= 0,60  $d =0,78$ ).

Con la biomasa aérea producida por el cultivo, se obtuvo menor desempeño del modelo, explicado por la dispersión registrada en valores observados en campo. En la NRMSE, no se logró el valor objetivo de desempeño (NRMSE<15%) sugerido por Reas et al. (2017), en ninguno de los dos regímenes hídricos evaluados.

Si bien el desempeño general del modelo en la simulación del rendimiento de grano fue muy satisfactorio, no se comportó bien en la simulación del rendimiento del cultivar de ciclo más corto (NA 5009) en la situación sin riego. La eficiencia del modelo presentó un valor de 0,04 y el índice de concordancia fue de 0,75 para este cultivar (Cuadro 10).

En general los valores de los índices de desempeño calculados para el rendimiento disminuyen de los indicadores objetivo en la medida que el ciclo del cultivo se aparta del ciclo del cultivar calibrado (NA6448). Esto sucede porque Aquacrop solo se puede representar factores relacionados al ciclo entre cultivares (longitud de las fases fenológicas, profundidad radicular, etc.) y en la realidad entra en juego otros factores fisiológicos asociados a la genética de adaptación, que establecen diferencias importantes en el rendimiento de los cultivares de igual ciclo (Castro et al., 2017).

Cuadro 10. Pruebas del desempeño del modelo para valores estimados por el modelo Aquacrop y valores observados en los tres cultivares de soja.

	CULTIVARES	n	RIEGO					SECANO				
			R2	RMSE	NRMSE	EF	d	R2	RMSE	NRMSE	EF	d
Cobertura	NA 5009	4	0,92	6,79	9,01	0,91	0,96	0,62	15,27	24,74	0,60	0,78
	NA5509	4	0,98	7,56	9,55	0,82	0,93	0,93	7,92	13,26	0,90	0,95
	NA 6448	4	0,98	4,84	6,07	0,95	0,98	0,96	6,31	9,10	0,93	0,96
Biomasa	NA 5009	2	0,91	1,18	36,73	0,82	0,91	0,97	0,54	17,49	0,94	0,97
	NA5509	2	0,91	1,13	27,59	0,89	0,93	0,96	0,60	19,07	0,94	0,97
	NA 6448	2	0,92	1,29	37,59	0,81	0,91	0,95	0,77	21,37	0,93	0,96
Rendimiento	NA 5009	3	0,91	0,49	28,35	0,83	0,93	0,82	0,79	63,10	0,04	0,75
	NA5509	3	0,99	0,17	8,12	0,99	0,99	0,99	0,29	18,44	0,93	0,97
	NA 6448	3	0,97	0,35	12,89	0,95	0,97	0,99	0,22	8,45	0,97	0,98

RIEGO= con riego. SECANO= sin riego. Cobertura= cobertura de la canopia en porcentaje de suelo cubierto. Biomasa= materia seca del cultivo sobre el suelo. Rendimiento= rendimientos en granos cosechados. NA 5009, NA 5509, NA 6448= cultivares de soja. n= número de observaciones,  $r^2$ = coeficiente de determinación, EF= eficiencia del modelo, RMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error. NRMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado. d= índice de concordancia de Willmott's.

#### 4 CONCLUSIÓN

- A pesar de la abundancia de precipitaciones durante la estación de crecimiento del cultivo se registraron períodos de déficit hídrico que provocaron reducción en el rendimiento potencial en granos en los tratamientos sin riego.
- El cultivar de ciclo más largo en seco redujo el tiempo de llenado de grano y maduración, mientras que en los restantes cultivares el régimen hídrico no alteró la longitud del ciclo de desarrollo.
- Los manejos de suelo previos a la siembra con el paraplow y trigo alcanzaron mayor IAF y cobertura del suelo en la etapa inicial del cultivo en relación al manejo con raigrás. Esta diferencia no se reflejó en la biomasa o en el rendimiento en granos al final del cultivo.
- El riego permitió que el cultivo logre mayor IAF, más rápida cobertura del suelo en la etapa inicial y mayor biomasa, lo que resultó posteriormente en mayor rendimiento en granos.
- No hubo diferencias en el IAF o la cobertura de suelo entre los tres cultivares. Cuanto más largo fue el ciclo del cultivar, fue mayor el tiempo en el mantenimiento de la máxima cobertura verde, la producción de biomasa en la cosecha y el rendimiento en granos.
- La diferencia en rendimiento en granos entre los tratamientos estuvo asociada a un mayor número de granos por unidad de área. El peso de los granos no se relacionó directamente con el rendimiento. No se observaron diferencias en el número de vainas por metro cuadrado entre los cultivares. La diferencia en el rendimiento entre los cultivares respondió al número de granos por vainas que logró cada genotipo.
- El manejo de suelo con paraplow presentó menor resistencia a la penetración del suelo a los 150 días después del laboreo, posteriormente este efecto se perdió a 320 días. La menor resistencia

a la penetración constatada al inicio del cultivo no tuvo incidencia en la distribución de las raíces en el suelo.

- Los diferentes manejos de suelo no modificaron la densidad aparente ni carbono activo del suelo.
- El modelo Aquacrop es una muy buena herramienta que permite la simulación de la biomasa y el rendimiento en granos, así como la evolución del contenido de agua del suelo en el cultivo de soja para las condiciones del noroeste de Uruguay; especialmente en los ambientes de riego y seco.
- La distribución de raíces en el perfil y el porcentaje de suelo cubierto por restos secos vegetales al momento de la siembra no modificó las simulaciones en el cultivo, tampoco alteró el balance de agua en el suelo.
- El modelo Aquacrop permitió discriminar el desarrollo vegetativo entre los tres cultivares en condiciones sin limitantes hídricas. En el ambiente en seco, el modelo no fue capaz de simular con precisión la cobertura, la biomasa y el rendimiento en granos en los cultivares que no fueron calibrados. Quizás el modelo pueda ser de mayor utilidad en la comparación de cultivares de grupos de madurez más contrastantes, por la duración de sus fases fenológicas.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- Abi Saab MT, Albrizio R, Nangia V, Karam F, Roupael Y. 2014. Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with Aquacrop. *International Journal of Plant Production*. 8(4): 457–482.
- Álvarez C. 2010. Rendimiento de cultivares de soja de grupo de madurez v y vi con riego complementario. Tesis de grado. Río Cuarto Argentina. Universidad nacional de rio cuarto facultad de agronomía y veterinaria. 41p
- Andriani J. 1997. Uso del agua y riego .En: Laura M, Giorda E, Hector E, Baigorri. (Eds.). El cultivo de soja en argentina. Marcos Juárez: INTA Manfredi (4). 448.
- Andriani J, Andrade F, Suero E, Dardanelli J. 1991. Water deficits during reproductive growth of soy beans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie, EDP Sciences*. 11(9). 737-746.
- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje .56. 298.
- Allen R, Pereira S, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper. 56. 300.
- Arbeletche P, Gutiérrez G. 2010. Crecimiento de la agricultura en Uruguay: exclusión social o integración económica en redes. Pampa (Santa Fe), (6), 113-138.
- Artigas M, García I. 2012. Efecto del cultivo de cobertura con y sin pastoreo sobre implantación, crecimiento y rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 66 p.

- Barbazán M, Bautés C, Beux L, Bordoli J, Cano J, Ernst O, García Lamothe A, García F, Quincke A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia*, 15(2): 93-99.
- Baigorri H, Ciampitti I, García F. 2009. Como Crece y se desarrolla el cultivo de soja. En. Manual de manejo del cultivo de soja. García, F.; Ciampitti, I.; Baigorri, H. International Plant nutrition Institute. p. 7-16.
- Baigorri. 2003. desarrollo y crecimiento de cultivares de soja en función de la fecha de siembra y su importancia en la recomendación de manejo. En. Jornada nacional de soja. Serie Actividades de Difusión INIA N° 325. Soriano. 101-113.
- Balzarini M, González L, Tablada M, Casanoves F, Di Rienzo J, Robledo C. 2008. Manual del Usuario. Córdoba Argentina. Editorial Brujas. 336.
- Blum A, Narbono I, Oyhantcabal G, Sacho D. 2008. Soja transgénica y sus impactos en Uruguay la nueva colonización. 196.
- Bodrero M. 2003. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. In: Jornada Nacional de la Soja (2003, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1- 13 (Actividades de Difusión no. 325).
- Botta G, Tolon-Becerra A, Lastra-Bravo M, Tourn. (2010). Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research* 110: 167–174.
- Box J. 1987. Modern Methods for Root investigations. En: *Plant Roots: The Hidden Half*. Ed: Waisel Y.; Eshel, A. y Kafkati, U.M. Decker 10: 191-238.
- Blake G, Hartge K. 1986. Bulk Density. En: A Klute (eds.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Wisconsin: Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison. 363- 375.

- Carriquiry F. 2015. Expansión reciente y sus efectos transformadores. En: Caetano G, Carriquiry F, Oddone G, Paolino C, Vaillant M, Bittencourt G, Mondelli M, Bervejillo J, Iglesias E. (Eds.). El desarrollo agropecuario y agroindustrial del Uruguay. Montevideo. Coordinación: Unidad de Comunicación Organizacional y Difusión MGAP, y Diego Campoy OPYPA-MGAP. 26-31.
- Castaño J, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. 2011. Caracterización Agroclimática del Uruguay – 1980-2009. Serie Técnica INIA, V. 193, 34p.
- Capurro M. 2016. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. Tesis Magister en ciencias agrarias. Montevideo Uruguay. Facultad de Agronomía. 149 p.
- Castro M, Cuitiño M, Manasliski S, Morales X, Cardozo V. (2017). Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja. Convenio INASE-INIA. Colonia Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología INIA La Estanzuela. 81p.
- Ceretta S, Mandl A. 2002. Adaptación de cultivares de soja en Uruguay. Serie Actividades de difusión N° 297. Colonia Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología INIA La Estanzuela. 52.
- Dardanelli J, Suero F, Andrade A, Andriani J. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11: 747-756
- Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo C. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- De la Casa C. 2011. Monitoreo de cultivos de maíz y estimación de rendimiento a nivel de lote con datos de aqua-modis en Córdoba, Argentina. Tesis Doctor en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba. 284p.

- De Oliveira T. 2018. Modelo Aquacrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos campos gerais. Tesis de maestría. Universidade federal do paraná. 105p.
- Doorenbos J, Kassam A. 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO, Riego y Drenaje N  33. Roma Italia. FAO. 213.
- Ernst O, Etchegoimberry P, Cadenazzai M, Izaguirre R. 2019. Descompactaci n sub superficial del suelo en sistemas de agricultura continua sin laboreo. FPTA 337, serie 72. 26 p.
- Ernst O, Bentancur O. 2004. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de n-no3, en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de la avena pastoreada. Agrociencia V 8 (1). 29-40p.
- Ernst O. 2004. Leguminosas como cultivo de cobertura. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 21: 1-10.
- Ernst O. 1999. Siembra sin laboreo de cultivos de verano. (en línea). In: Siembra sin laboreo de cultivos y pasturas. Montevideo, Facultad de Agronomía/INIA/PROCISUR.
- FAO. 2016. FAOSTAT (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Dirección de Estadística). Base de datos estadísticos. En línea. Consultado 2016. Disponible en <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S>.
- Fassio A, Pérez O, Ibáñez W, Rabaza C, Vergara G, Sawchik J, Schusselin M, Silva L. 2016. Soja: Rendimiento con y sin riego a diferentes poblaciones de siembra. Revista N  47. 22-26.
- Fehr W, Caviness C. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University of science and technology Cooperative Extension Service, Special Report, V.80, 11p. Disponible en [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR\\_000g50w2l4s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/STAGES.+FEHR_000g50w2l4s02wx5ok0dkla0sik2sqav.pdf)

- Fehr W, Caviness C, Burmood D, Pennington J. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*. V. (2). 929-932.
- García Prechac F. 1998. Siembra directa de pasturas. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado 7 set. 2011. Disponible en <http://www.rau.edu.uy/agro/uepp/siembra5.htm>.
- García F, Ciampitti I, Baigorri H. 2009. Manual de manejo del cultivo de soja. Buenos Aires, International Plant Nutrition Institute. 190.
- Gasó D. 2018. Respuesta del rendimiento de soja a la densidad de siembra en ambientes de productividad contrastante. *Agrociencia Uruguay*, 22(2), 1-12.
- Gil R. 2005. Disponibilidad de agua y crecimiento de raíces: algunos aspectos del cultivo de soja. Centro Soja 2005. "Hacia la sustentabilidad del negocio argentino, en la región" Colegio de Ingenieros Agrónomos de la Provincia de Santa Fe IV Circunscripción. Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.- 4 y 5 de Agosto de 2005.
- Gilsanz J, Peralta G. 2015. Determinación de carbono activo en suelos bajo diferentes situaciones productivas en Uruguay. Congreso latinoamericano de agrociencia, La Plata Argentina. 1-6 p.
- Giménez L. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Effect of Water Deficiencies at Different Stages of Development on Soybean Yield*, 1, 53–64.
- Giménez L, Paredes P, Pereira L. 2017. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models. *Water (Switzerland)* 9(6).
- Giménez L, Canosa G, Prieto C, Grasso J, Montero A, Rameau M, Arevalo R. 2014. Respuesta física y económica al riego suplementario en cultivos y pasturas y desarrollo de la tecnología de riego por superficie en siembra directa. *Serie FPTA N° 55*, P. 66.

- Giménez L, García M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15(2), 100–108.
- Giorda M, Baigorri H. 1997. El cultivo de la soja en Argentina .INTA.C.R Córdoba. p.448.
- Hamza M, Anderson W. 2005. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82 .121–145p.
- Hillel D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. New York. 413 p.
- Hill M. 2016. Riego en Uruguay: estrategias para su desarrollo. *Anuario de OPYPA*.pp.271-282.
- Hsiao T, Heng L, Steduto P, Rojas-Lara B, Raes D, Fereres E. 2009. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3): 448–459.
- Jones J, Hoogenboom G, Porter C, Boote K, Batchelor W, Hunt L, Wilkens P, Singh U, Gijsman A, Ritchie J. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235-265.
- Jorajuria D. 2014. Compactación por tráfico en sistemas de agricultura continúa sin laboreo. p 78.
- Kantolic A. 2008. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de Soja: Impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. *Revista Facultad de Agronomía UBA*, 28(1), 63–88.
- Kantolic A, Giménez P, De La Fuente E. 2004. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en soja; En: Satorre E. H. et al. Edición: *Producción de Granos: Base funcionales para su manejo*. FAUBA Cap.: 9, p: 167-201.

- Keating B, Carberry P, Hammer G, Probert M, Robertson M, Holzworth D, Huth N, Hargreaves J, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K, Asseng S, Chapman S, McCown R, Freebaim D, Smith C. 2003. An overview of APSIM; a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18:267-288.
- Letey J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*1:273-294.
- López M, Chaves C, Florez R. 2011. Modelos de cultivos y modelos fenológicos. En. Víctor J, Flórez R, Barrientos J, Alfonso F, Alvarado P, Martínez F, Roca R. (Eds.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia. 153-177.
- Mandl F. 1994. Tipo de cultivares y época de siembra. In. *Girasol y Soja: algunos aspectos tecnológicos de producción para el litoral oeste de Uruguay*. Boletín de Divulgación INIA N° 47. Colonia Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología INIA La Estanzuela .105-108.
- Martino D. 1999. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistema de siembra directa. Montevideo Uruguay. PROCISUR. 225-257.
- Martino D. 1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis Ph.D. Manitoba Canada. University of Manitoba. 264 p.
- Martino D. 1994. Avances experimentales en siembra directa. Colonia Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología INIA La Estanzuela. 11-27 p
- McMaster G, Wilhelm W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 87 (4): 291-300.

- Molfino J, Califra A. 2001. Agua disponibles de las tierras del Uruguay. División Suelos y Aguas Dirección General de Recursos Naturales Renovables Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Montoya F. 2013. Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis Doctoral de Ingeniería Agrónoma. Albacete España. Universidad de Castilla-La Mancha. 270 p.
- Montoya F, García C, Pintos F, Otero A. 2017. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. *Agricultural Water Management*. 193: 30–45.
- Montoya F, Otero A. 2019. Is Irrigating Soybean Profitable In Uruguay? A Modeling Approach. *Agronomy Journal*. 111: 1-15.
- Morla F, Giayetto O. 2012. Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano De La Ciencia Del Suelo.
- Morón A. 2005. Informe de resultados de la red de ensayos de fertilización y fijación biológica de nitrógeno en soja 2003-04. Jornada Técnica de Cultivos de Verano. Agosto 2005. Serie de Actividades de Difusión N°417. INIA.
- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias). DIEA. 2017. Anuario Estadístico Agropecuario. Montevideo, Uruguay. 213p.
- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias). DIEA. 2016. Anuario Estadístico Agropecuario. Montevideo, Uruguay. 179p.
- Micucci F, Taboada M. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in

- the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. (86). 152-162.
- Nakayama F. 1980. Los componentes fisiológicos del rendimiento en la soja. Cátedra de Fisiología Vegetal. Facultad de Agronomía. V. N. R. Santa Fe -2051- Rosario Santa Fe, 97-107.
- Otero A, Montoya F, García C. 2017. Programación del riego. Serie técnica INIA N° 232. Montevideo Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA. 68.
- Ovando G, Sayago S, Salvagiotti F. 2017. Estimación del rendimiento de soja con datos de radiación solar de CERES. En: Congreso argentino de agroinformática, (46, 2017, Córdoba Argentina). XLIII CLEI. Córdoba Argentina. SADIO. 20–32.
- Parr J, Bertrand A. 1960. Water Infiltration Into Soils. *Advances in Agronomy*.311-363.
- Raes D, Steduto P, Hsiao T, Fereres E. 2009. AquaCrop--The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*. 101: 438-447.
- Raes D, Steduto P, Hsiao T, Fereres E. 2012. AquaCrop reference manual. Annex 1. Crop parameters. Reference Manual of AQUACROP, 2–69.
- Raes D, Steduto P, Hsiao T, Fereres E. 2017. AquaCrop Reference Manual, Roma, FAO (disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>).
- Rucks L, García F, Kaplan A, Ponce De León J, Hill M. 2004. Propiedades físicas de los suelos. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 68 p.
- Salvagiotti F, Rotundo J, Di Mauro G, Condorí A, Gallo S, Pozzi R, Boxler M. 2016. Rendimientos Potenciales y Brechas de Rendimiento de soja en la campaña 2014-15. *Para Mejorar La Producción*, 54(3):129–136.
- Sawchik J. 2012. Necesidades de riego en cultivos y pasturas. In. *Riego en Cultivos y Pasturas*. Segundo Seminario Internacional. P. 55-68.

- Sawchik J. 2006. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur. Programa cooperativo para el desarrollo tecnológico agroalimentario y agroindustrial del cono sur, p. 165-170.
- Sawchik J, Ceretta S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. In. Jornada técnica de cultivos de verano. Serie Actividades de Difusión N° 417, p. 41-45.
- Schneider F, Axel D, Hennings I, Schmittmann O, Seidel S. 2017. The effect of deep tillage on crop yield. What do we really know?. Soil and Tillage Research 174: 193–204.
- Singh J, Salaria A, Kaul A. 2015. Impact Of Soil Compaction On Soil Physical Properties And Root Growth: A Review. International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences ISSN. 5(1).23-32.
- Silva A, Ponce de Leon J, García F, Duran A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Boletín de Investigación N° 10. Montevideo Uruguay. Facultad de Agronomía. 20.
- Siri P, Ernst O. 2011. Raigrás como cultivo de cobertura: Efecto del largo del período de barbecho sobre la disponibilidad de agua, el riesgo de erosión y el rendimiento de la soja. Cangüé. N°. 31: 18-27.
- Steduto P, Hsiao T, Raes D, Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101(3): 426–437.
- Steduto P, Hsiao T, Fereres E, Raes D. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje 66. Roma Italia. FAO. 510.
- Tanner C, Sinclair T. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search. In: Taylor, H.M., et al. (Eds.), Limitations to Efficient Water

Use in Crop Production. American Society of Agronomy, Madison, WI. 1–27.

Terra J, Cantou G, Oxley M, Furtado I, Bordagarri A, Sawchik J. 2012. Potencial productivo del cultivo de soja sin limitantes de agua. Serie de actividades de difusión N° 713. Colonia Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología INIA La Estanzuela. 19–21.

Villasuso N. 2015. Estrategias de crecimiento y generación del rendimiento potencial en ocho genotipos de soja (*glycine max (l.) merr*) que difieren en su grupo de madurez. Universidad Nacional de Villa María IAP Ciencias Básicas y Aplicadas. 44 p.

Xin Y, Xie Y, Liu Y. 2019. Residue Cover on Infiltration Process of the Black Soil Under Rainfall Simulations. *Water*, 11 (12), 2593.

## 6 ANEXOS:

### CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP EN EL CULTIVO DE SOJA BAJO DIFERENTES MANEJOS DEL SUELO Y CULTIVARES

Pintos Baptista, Federico<sup>1</sup>; García, Claudio<sup>2</sup>; Otero, Alvaro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Estación Experimental Salto. Departamento de producción y utilización de pasturas.

Facultad de Agronomía. Universidad de la República. E-mail: [fedepintos03@gmail.com](mailto:fedepintos03@gmail.com)

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

<sup>3</sup>*Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). INIA-Salto Grande, Camino al Terrible s/n, 50000, Salto, Uruguay.*

Manuscrito a ser presentado en la revista Agrociencia Uruguay.

## Resumen

El cultivo de soja en Uruguay ocupa más de 1000000 ha, con un rendimiento medio de 2000 kg ha<sup>-1</sup> en las últimas 10 zafras. El rendimiento potencial supera los 6000 kg ha<sup>-1</sup> a nivel experimental. Una de las principales razones que explican la brecha en producción del cultivo de soja es el déficit hídrico en el período estival. Aquacrop es un modelo desarrollado por FAO que permite estimar el desempeño de un cultivo en diferentes escenarios de disponibilidad de agua, riego incluido. El objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo de crecimiento Aquacrop en el área de Salto y evaluar la sensibilidad del modelo para detectar diferencias, en el manejo del suelo previo a la siembra, a los cultivares de soja y a la incorporación del riego. Con este propósito, se diseñó un experimento que involucró tres factores: manejo del suelo, cultivar y riego, en la Estación Experimental Facultad de Agronomía Salto, ubicada en el km 21,5 de la ruta 31. Se establecieron tres manejos previos a la siembra del cultivo: i) cobertura de trigo, ii) cobertura de trigo y uso de paraplow y iii) cobertura de raigrás con el fin de incidir en la exploración radicular y en el almacenamiento de agua. Además, se incorporaron 3 cultivares de soja y el riego. El diseño experimental fue de parcelas subdivididas. Se logró un buen ajuste del modelo; el cultivar calibrado (NA6448) logró representar la situación en riego y seco, como también las diferencias entre los cultivares pero no logró representar las diferencias entre los tres manejos del suelo previo a la siembra.

**Palabras clave:** Soja, riego, manejo de suelo, Aquacrop

## **Aquacrop Model Calibration of the in Soybean under different Soil Managements and Cultivars**

### **Summary**

Soybean crop production in Uruguay occupies more than 1000000 ha with a mean yield of 2000 kg ha<sup>-1</sup> in the last 10 years. The potential yield exceeds 6000 kg ha<sup>-1</sup>, at experimental level. One of the main reasons to explain the production gap in soybean is the soil water deficit during Summer. Aquacrop is a model developed by FAO which allows to estimate the crop performance in different scenarios of water availability, irrigation included. The objective of this work was to calibrate the Aquacrop growth model and to evaluate the model sensitivity to detect differences in soil management prior sowing, soybean cultivars and irrigation. For this purpose, it was designed an experiment with three factors: previous soil management, cultivar and irrigation, at the Salto Agronomy Experimental Station, located on 31 route km 21.5. Three winter soil management were established prior to the soybean sowing: i) wheat cover, ii) wheat cover and paraplow and iii) raigras cover, in order to influence the root exploration deep and water storage. Additionally, it was included three soybean cultivars and irrigation. It was used an experimental design with subdivided plots. A good fit of the model was reached. The calibrated cultivar (NA6448) represents satisfactorily well the situation in irrigation and rainfeed crop, as well as the differences between cultivars but do not represents well, the differences between the three soil management before sowing.

**Key words:** soybean, irrigation, soil management, Aquacrop.

## Introducción

El área sembrada en Uruguay aumentó de 400000 hectáreas en el año 2000 a 1500000 en el año 2015 <sup>(1)</sup>. Dicho incremento fue consecuencia del aumento del precio internacional de los granos y a una coyuntura impositiva favorable en Uruguay, en comparación con Argentina, que inició un proceso inversor desde el vecino país junto con innovaciones tecnológicas en los sistemas productivos <sup>(2)</sup>. Esta expansión agrícola en Uruguay respondió con el aumento de la superficie sembrada de cultivos de verano específicamente el cultivo de soja <sup>(3)</sup>.

La variabilidad de las precipitaciones, en frecuencia e intensidad <sup>(4)</sup> y en general, a la baja capacidad de almacenaje de agua de los suelos agrícolas en Uruguay <sup>(5)</sup>, sumado al deterioro de algunas propiedades físicas del suelo, afectan negativamente la productividad de los cultivos, especialmente los estivales. Los suelos con malas condiciones físicas afectan el crecimiento vegetal: a) la capacidad de exploración radicular; b) la disminución del agua disponible para el cultivo, a través de la reducción en la infiltración del agua en el suelo y la compactación; c) el intercambio de gases y el flujo de temperatura del suelo, repercutiendo en la actividad microbiana <sup>(6)</sup>. Estos factores provocan que los cultivos extensivos de verano y en espacial el cultivo de soja, afronten períodos de estrés hídrico que inciden y comprometen -con frecuencia- el rendimiento <sup>(7)</sup>. La disponibilidad de agua es la principal responsable de la falta de estabilidad productiva y de la brecha entre los rendimientos potenciales y los obtenidos a nivel comercial <sup>(8)(9)(10)</sup>.

El riego es una alternativa tecnológica que permite aumentar el rendimiento (cultivos, pasturas) y mejorar la estabilidad en la producción entre años. En la zona noroeste del país, por condiciones edáficas diferentes a la zona agrícola tradicional, cobra mayor importancia esta tecnología. Levantando la limitante de disponibilidad de agua en el cultivo de soja y con el uso de cultivares más adaptados se pueden lograr rendimientos en granos superiores a 4000 kg ha<sup>-1</sup> <sup>(9)</sup>. El rendimiento promedio nacional del cultivo de soja oscila en los 2000 kg ha<sup>-1</sup>. El área bajo riego del cultivo de soja representa solo el 0,7 % del área sembrada en el país, en la zafra 2015/16 el rendimiento en granos promedio superó en un 46% al obtenido en secano <sup>(11)</sup>.

Las variaciones en el rendimiento de soja son consecuencia de efectos del genotipo, del ambiente y de la interacción entre ambos <sup>(12)</sup>. La elección del cultivar y de la fecha de siembra es clave a la hora de ubicar el período crítico del cultivo (R4-R6) <sup>(13)</sup>. En secano, la estrategia para mejorar el rendimiento es ubicar el período crítico del cultivo durante el momento de menor probabilidad de ocurrencia de estrés hídrico <sup>(14)</sup>. El modelo Aquacrop fue desarrollado por FAO (2009), y permite simular el crecimiento y desarrollo de cultivos herbáceos en función del consumo de agua en condiciones con y sin riego <sup>(15)</sup> y definir estrategias en la programación del riego. Permite además evaluar el impacto del medio ambiente y la gestión de los cultivos. Este modelo fue calibrado y validado en diferentes regiones del mundo para diferentes cultivos; el cultivo de soja fue calibrado para Uruguay <sup>(16)(17)</sup>, Líbano<sup>(18)</sup>, y Argentina <sup>(19)</sup>; el cultivo de maíz fue calibrado en Argentina <sup>(19)(20)</sup>, y España<sup>(21)</sup>; el cultivo de papa fue calibrado en España <sup>(22)</sup>. El modelo Aquacrop calibrado podría ser una buena herramienta de orientación a la hora de tomar decisiones en la gestión y programación de riego y para evaluar el comportamiento de diferentes cultivares de soja en distintas situaciones de manejo de suelo.

El objetivo del presente trabajo fue ajustar los parámetros del modelo Aquacrop de forma tal que pueda discriminar el riego, cultivares y manejo del suelo previo a la siembra, en el rendimiento de granos y en los componentes del rendimiento del cultivo de soja.

## **Materiales y métodos**

El ensayo fue instalado en el área experimental de la Estación Experimental Facultad de Agronomía en Salto (EEFAS) (31° 22'31" S, 57° 42'54"O, altitud 78 m), ubicada en ruta 31 km 21,5. El suelo del sitio experimental se clasifica como Brunosol Éutrico perteneciente a la Unidad Itapebí-Tres Árboles.

Con la meta de evaluar el desempeño del modelo Aquacrop y ajustar los parámetros necesarios en el cultivo de soja bajo riego en Uruguay, se definieron tres factores que podrían describir diferentes situaciones de crecimiento: a) el manejo del suelo previo a la siembra de la soja, b) el régimen hídrico del suelo en el cultivo de soja y c) los cultivares de soja.

a) Manejo del suelo previo a la siembra de la soja (cobertura invernal del suelo). Luego de la cosecha del cultivo de verano (soja zafra 2015-2016), se definieron tres manejos diferentes del suelo a instalar durante el otoño-invierno: i) uso del paraplow a 0,4 m de

profundidad y posterior siembra de trigo con 90 unidades de nitrógeno, ii) siembra de trigo con 90 unidades de nitrógeno sin uso de paraplow y iii) siembra de raigrás sin uso del paraplow. La aplicación de nitrógeno se realizó al voleo en cobertura de forma manual. Se fraccionó en tres momentos en el ciclo del trigo (siembra, formación de macollos y elongación de entrenudos) aplicando el equivalente 30 UN (unidad de nitrógeno) ha<sup>-1</sup> en cada una.

b) Régimen hídrico del suelo. Se definieron dos niveles de agua en el suelo: i) permitiendo el agotamiento máximo hasta de un 30% del agua disponible (AD) del suelo y completar el agua del suelo hasta capacidad de campo a través del aporte agua por el riego y ii) permitiendo el agotamiento del agua del suelo de acuerdo a la precipitación y evapotranspiración del cultivo sin uso del riego (secano). El contenido de agua en el suelo fue monitorizado a través de un balance diario de agua del suelo según la evapotranspiración del cultivo y sensores de capacitancia. Para estimar el consumo de agua por la planta se utilizó como guía el procedimiento propuesto por FAO-56<sup>(23)</sup>. La lámina de riego se reponía hasta capacidad de campo cada vez que el contenido de agua del suelo descendiera hasta un 30% el AD total en la zona radicular, los Kc utilizados fueron 0,50 al inicio del cultivo, 1,15 a mediados de estación y 0,50 al final.

c) Cultivares. Se eligieron tres cultivares de soja representativos, con buen potencial de rendimiento de la región: i) cultivar NA 5009, ii) cultivar NA 5509 y iii) cultivar NA 6448.

La siembra del cultivo de soja se realizó el 2 de diciembre de 2016, la población lograda fue de 380.000 plantas por ha a 0,40 m de distancia entre hileras. La inoculación de la semilla se realizó instantes antes de la siembra para asegurar una buena nodulación.

El criterio para el control de plagas y malezas fue por presencia, para no tener interferencia en las variables evaluadas. Se realizaron controles preventivos para enfermedades según el monitoreo de la fenología del cultivo y las condiciones climáticas.

El sistema de riego utilizado estaba compuesto de emisores de goteo (NETAFIM) autocompensantes y antidrenantes, con un caudal de 1,6 L h<sup>-1</sup> y a 0,5 m de distancia entre emisores en la línea; en el diseño, cada línea en la parcela estaba conectada al mismo lateral. Se instaló una línea de riego en cada entrefila de siembra del cultivo en cada parcela (5 líneas de riego por parcela).

Para medir el contenido de agua en el suelo se utilizaron, sensores de capacitancia FDR (10HS, Decagon, USA) colocados a los 10, 20, 30, 45 y 60 cm de profundidad, en todas las parcelas del bloque del cultivar NA5509. El registró se realizó de forma automática cada 30 minutos.

Los registros climáticos fueron recopilados con una estación climática Spectrum (Wachdog, Spectrum, USA) cada 10 minutos; ubicada en la propia estación experimental San Antonio, a una distancia del experimento de 1,5 km. Se registraron datos de temperatura y humedad del aire, velocidad promedio y máxima del viento, radiación global incidente y precipitación. Para la estimación de la evapotranspiración diaria se utilizaron los registros de la Estación Experimental de INIA Salto Grande calculada por el procedimiento de la guía FAO-56<sup>(23)</sup>

La resistencia a la penetración se determinó con un penetrómetro de cono (30°) en cuatro momentos posteriores al laboreo inicial del suelo: a) inmediatamente antes de la siembra de la soja, b) 40 días posteriores a la siembra de la soja, c) en floración del cultivo de soja (R1) a 70 días de la siembra, y d) antes de cosecha de la soja, diez meses luego del laboreo con paraplow. Se hicieron 2 medidas por parcela en todas las parcelas del experimento.

La densidad aparente del suelo se determinó antes de la cosecha de la soja, en dos profundidades (5 a 10 y 15 a 20 cm). Se tomó dos muestras del suelo imperturbadas por parcela, con un cilindro biselado de 100 mL<sup>(24)</sup>.

La fenología del cultivo se registró cada tres días usando la escala de Fehr y Caviness<sup>(25)</sup>, como guía para la definición cada estado fenológico del cultivo. La observación se realizó en todas las parcelas del experimento.

Se midió la cobertura verde del follaje a lo largo del ciclo del cultivo tomando periódicamente imágenes. Las imágenes fueron tomadas perpendiculares a 1,5 m sobre la superficie de la canopia. Se realizaron 3 imágenes en cada parcela. A tal efecto se utilizó la cámara digital GoPro (Hero, USA) colocada en un soporte de tal manera que no hubiera sombras en las imágenes. Se calculó el porcentaje de pixeles verdes en cada imagen utilizando el programa *Easy Leaf Area*,<sup>(26)</sup>.

Se midió la biomasa del cultivo sobre la superficie del suelo y área foliar cada diez días. Se realizó en base al corte de una muestra de las plantas comprendidas en 0,5 m lineal dentro de la parcela. En el laboratorio, se contaron y registraron el número de plantas y el peso fresco, el peso seco de cada uno de los componentes de la planta cosechados: hojas, tallos y cuando fue oportuno, el número y peso de vainas y granos, y granos por vaina. El área foliar de cada planta en cada muestreo fue medida con un medidor de área foliar (LICOR-3000, USA), pasando todas las hojas de cada planta individual.

Para evaluar la distribución radicular se realizó una calicata con excavadora a lo largo de todo un bloque de 0,70 m de profundidad y 0,80 m de ancho. Se colocó una rejilla cuadrada de alambre de 0,70 por 1,50 m de tamaño, con celdas de 0,02 m de lado como guía para poder contar las raíces en el suelo, luego de exponer a la luz las raíces fuera de la capa lateral del suelo. Se tomaron 4 fotografías digitales perpendiculares al perfil vertical del suelo por rejilla en cada posición dentro de la parcela. El procesamiento de la imagen consistió en contabilizar el número y posición de las celdas de 2 cm de lado con presencia de raíces. Se digitalizaron los datos de la imagen de la grilla a en una planilla Excel utilizando códigos numéricos para poder evaluar esta variable. Se calculó el porcentaje de celdas con raíces en cada profundidad en relación al total de celdas con raíces.

La cosecha se realizó en forma manual con un contenido de humedad de los granos promedio de 13 % en todas las parcelas, las plantas fueron embolsadas para su posterior trilla con una trilladora experimental (Marca Feretti, Modelo mtr 602). Para estimar el rendimiento dentro de la parcela se cosechó un área de 9,6 m<sup>2</sup>. Se determinó el peso de los granos, el número de granos por planta, el número de vainas por planta, el peso de mil granos y porcentaje de humedad de los granos al momento de cosecha.

El diseño experimental fue de parcelas subdivididas con tres bloques completos al azar. La parcela principal corresponde al factor manejo de suelo y posee tres niveles (Paraplow, Raigrás, Trigo), la sub parcela corresponde al factor régimen hídrico del suelo y tiene dos niveles (riego y seco) y la sub - subparcela corresponde al factor cultivar con tres niveles (NA5009, NA5509, NA6448). El tamaño de la parcela fue de 1,6 m de ancho y 20 m de largo.

Para realizar el análisis estadístico de las variables obtenidas en el cultivo y en el suelo se utilizó el software InfoStat/P <sup>(27)</sup>.

El ajuste inicial de los parámetros en el modelo Aquacrop se basó fundamentalmente en los valores propuestos en la literatura <sup>(28)(16)(17)(18)</sup>, utilizando los parámetros previamente ajustados por estos autores como referencia; posteriormente se realizaron los ajustes pertinentes de acuerdo a los factores estudiados en este experimento.

Para la evaluación del rendimiento del modelo, se basó en los siguientes indicadores estadísticos: a) Coeficiente de Correlación de Pearson, b) Cuadrado Medio del Error Cuadrado Medio del error normalizado. c) Modelo de eficiencia (Nash-Sutcliffe), d) Índice de concordancia (Willmott's).

Para evaluar el comportamiento del modelo según el genotipo o la situación previa a la siembra, se identificaron los parámetros que caracterizaban a cada situación. Se ingresó al modelo con el valor del parámetro obtenido de referencia o con el valor estimado según los datos observados en campo, luego del ajuste. Posteriormente se calcularon los indicadores estadísticos del desempeño del modelo entre los valores simulados por el modelo y los valores observados en el campo.

## **Resultados**

### **Valores observados en campo y laboratorio**

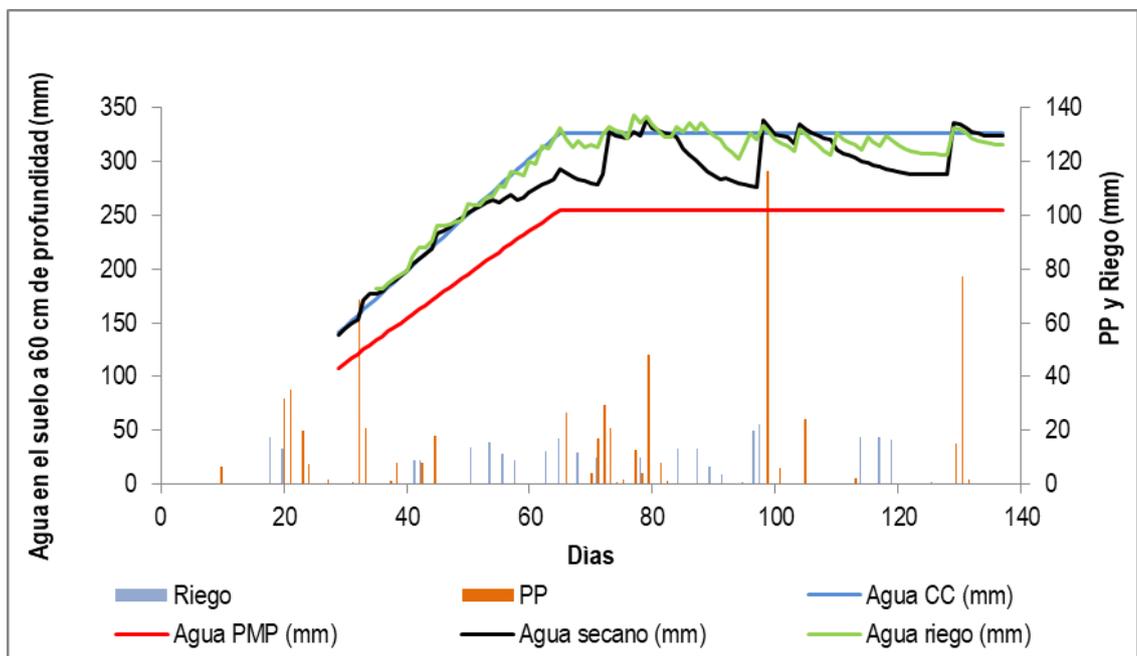
En el período de siembra a cosecha la evapotranspiración máxima del cultivo (ET<sub>c</sub>) fue de 554 mm y la oferta de agua por precipitaciones fue de 667 mm para el mismo período. Si bien la oferta superó la demanda, la distribución de los eventos de lluvia durante la estación del cultivo y la variabilidad en el volumen precipitado, fue necesario aplicar una lámina neta de riego de 272 mm durante el ciclo para lograr cubrir la demanda por evapotranspiración del cultivo.

Las precipitaciones fueron abundantes durante ese verano; la distribución en el tiempo y en volumen de los eventos de lluvia, ocasionaron períodos de excesos de lluvia y períodos de déficits en los cuales se registraron descensos significativos en el contenido hídrico del suelo en los tratamientos en secano. Los eventos de estrés por déficit hídrico coincidieron con el estado fenológico de floración (R1-R3), la primera etapa de llenado de granos (R5) y luego

en la etapa de maduración del cultivo (R6-R8). El rendimiento promedio de los tratamientos en secano fue de 1032 kg ha<sup>-1</sup> por debajo del promedio de los tratamientos regados.

La evolución del contenido de agua en el suelo para los tratamientos en secano (figura 1) muestra descensos en el contenido de agua que perduraron de 10 a 20 días.

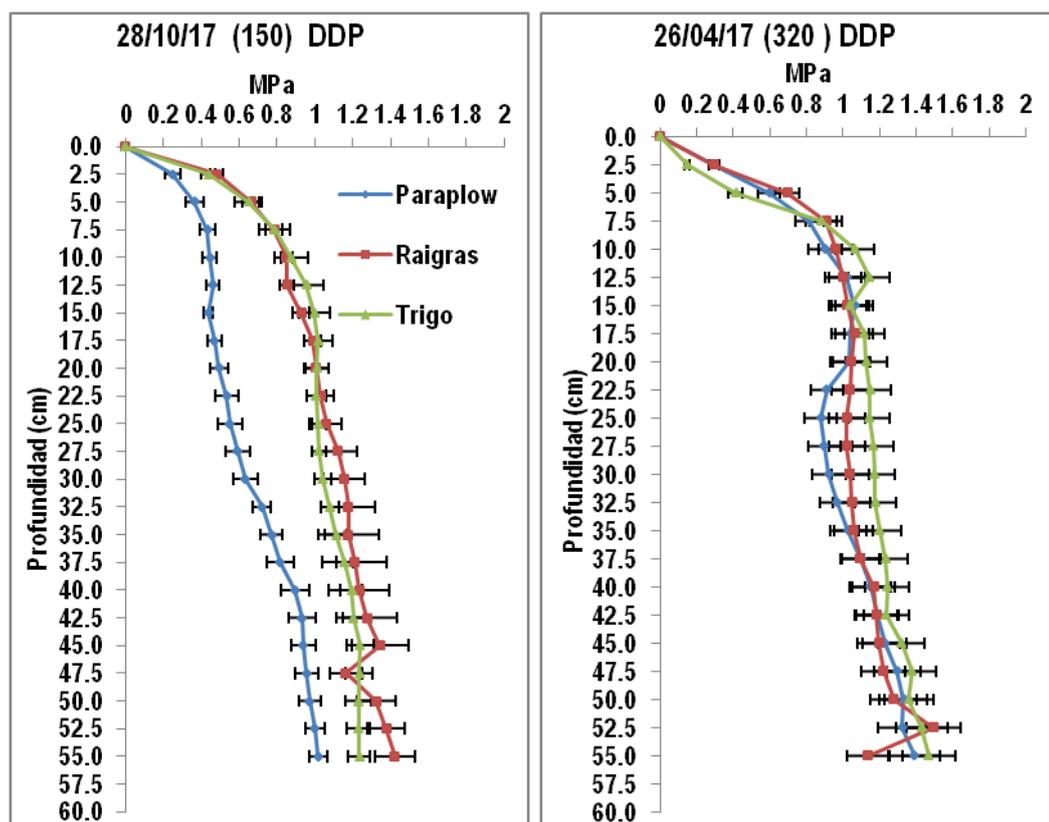
No se observaron diferencias en el contenido de agua en el suelo entre los manejos previos en los regímenes hídricos probados.



**Figura 1.** Evolución del contenido de agua del suelo en el cultivo de soja con y sin riego, en manejo del suelo previo con cobertura de raigrás (sensores de capacitancia 10HS). PP=precipitación (mm). Agua secano= contenido de agua en el suelo (mm) el cultivo sin riego. Agua riego= contenido de agua en el suelo (mm) para el cultivo con riego. Riego= lamina neta de agua de riego aplicada (mm). Agua CC= contenido de agua en el suelo en capacidad de campo (mm) a profundidad radicular. Agua PMP=contenido de agua en el suelo en punto de marchitez permanente (mm) a profundidad radicular.

La resistencia a la penetración fue menor en el suelo con laboreo profundo a los 150 días después del laboreo (DDP). En evaluaciones posteriores a los 150 días se registró un aumento de la resistencia (figura 2). A los 320 días después de laboreo se observaron

solamente diferencias en el suelo trabajado con el paraplow a la profundidad de 22 a 35 cm del perfil. La menor resistencia a la penetración observada en el manejo con paraplow no provocó cambios en la distribución y crecimiento radicular con respecto a los manejos sin laboreo. La densidad aparente no se modificó por el efecto del manejo del suelo previo a la siembra.



**Figura 2.** Resistencia a la penetración del suelo (MPa) en dos momentos. DDP= días después de laboreo con paraplow. Manejos de suelo previo al cultivo de soja: Raigrás= cobertura de raigrás, Trigo= cobertura de trigo, Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo. Las barras corresponden a desvío estándar entre las mediciones a cada profundidad, n= 12.

El incremento de la cobertura verde del cultivo regado fue mayor que la cobertura del secano (figura 3). El cultivo sin riego alcanzó la máxima cobertura más tarde que el con riego y presentó una caída de la cobertura por senescencia más acelerada que el regado al acercarse a la madurez. No se observaron diferencias en la velocidad con que cada cultivar

logra alcanzar la cobertura máxima del suelo. Los cultivares se diferenciaron en el tiempo en que cada uno logró mantener la máxima cobertura.

El cultivo bajo riego presentó (cuadro 1) mayor producción de biomasa sobre el suelo y mayor rendimiento en granos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). El aumento del rendimiento respondió principalmente a aumentos del número de granos por superficie. La relación entre número de granos por superficie y el rendimiento de granos fue de  $r^2= 0,89$ . Se encontraron diferencias significativas en el rendimiento entre cultivares.

**Cuadro 1.** Efectos del manejo previo del suelo, el régimen hídrico y el cultivar en el rendimiento en granos y en componentes del rendimiento en el cultivo de soja.

Manejo= manejo previo del suelo (Trigo= cobertura de trigo, Raigrás= cobertura de raigrás, Paraplow= laboreo con paraplow más cobertura de trigo). Agua= régimen hídrico (Riego, Secano). Cultivar= cultivares de soja (NA 5009, NA 5509, NA 6448). P.S. 1000= peso seco de 1000 granos.

Manejo	Agua	Cultivar	Vainas (N° m <sup>-2</sup> )	Granos (N° m <sup>-2</sup> )	P.S. 1000 Granos (g)	Rendimiento grano (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa (MS kg ha <sup>-1</sup> )
Paraplow			1398 ns	2976 ns	144,5 ns	3891 ns	8765 ns
Raigrás			1493	3270	145,1	3859	9196
Trigo			1493	3248	142,2	3924	9698
	Riego		1609 ns	3540 a	145,3 ns	4407 a	10249 a
	Secano		1313	2787 b	142,6	3375 b	8190 b
		NA 5009	1411 ns	2637 b	148,7 a	3416 c	8305 b
		NA 5509	1361	3165 ab	142,1 b	3758 b	9303 a
		NA 6448	1612	3691 a	141,1 b	4499 a	10051 a

Medias en las columnas seguidas de diferentes letras son significativamente distintas por el Test de Tukey ( $p<0,05$ ). ns= sin diferencias estadísticas.

### Calibración del modelo

Los parámetros conservativos ajustados para el modelo (cuadro 2) se encontraron en el rango de los parámetros citados por varios autores a nivel nacional <sup>(30)(16)(17)(18)</sup>.

Se logró un buen ajuste entre valores observados y valores simulados para el cultivar calibrado (NA 6448) con y sin riego (figura 3).

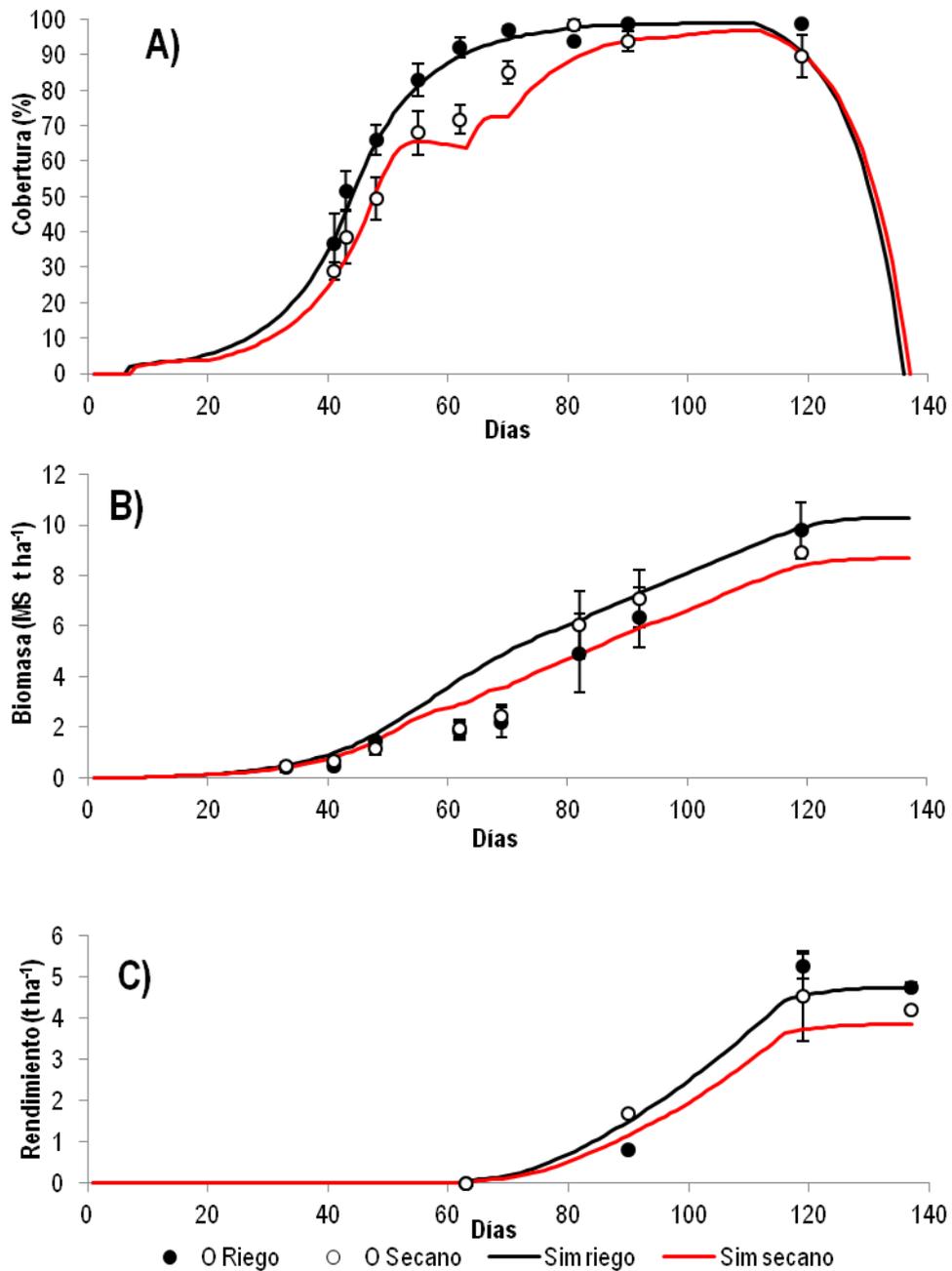
En el cultivo en seco se observa una buena concordancia en el contenido de agua en el suelo entre valores simulados y observados (figura 4). En el período comprendido entre 40 y 70 días posteriores a la siembra, se observaron diferencias notorias en el contenido de agua del suelo entre los valores observados y simulados. Esta diferencia responde a una sobrestimación de la evaporación que perdura hasta que el cultivo cubre el suelo. Los valores de los diferentes indicadores del desempeño del modelo son satisfactorios (cuadro 3) y están comprendidos dentro de los valores de aceptación citados por Raes y otros <sup>(28)</sup>. Se alcanzó el umbral objetivo en cada indicador en la mayoría de las variables ajustadas (Coeficiente de determinación ( $r^2 > 0,80$  %), Raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizada (NRMSE  $< 15$  %), eficiencia del modelo, Nash-Sutcliffe (EF  $> 0,60$ ), índice de concordancia de Willmott's ( $d > 0,80$ )). El mejor ajuste se logró en la estimación de la cobertura del cultivo bajo riego (6,07; 0,95; 0,98 para NRMSE, EF y d respectivamente).

En el cultivo con riego, la cobertura simulada fue semejante a la observada en campo para cada cultivar. En el cultivo sin riego se observó una sobreestimación de la cobertura y rendimiento en granos en los cultivares NA5009 y NA5509 en la etapa de senescencia del cultivo, causa que disminuyó el ajuste de estos cultivares.

**Cuadro 2.** Parámetros de entrada para el modelo Aquacrop

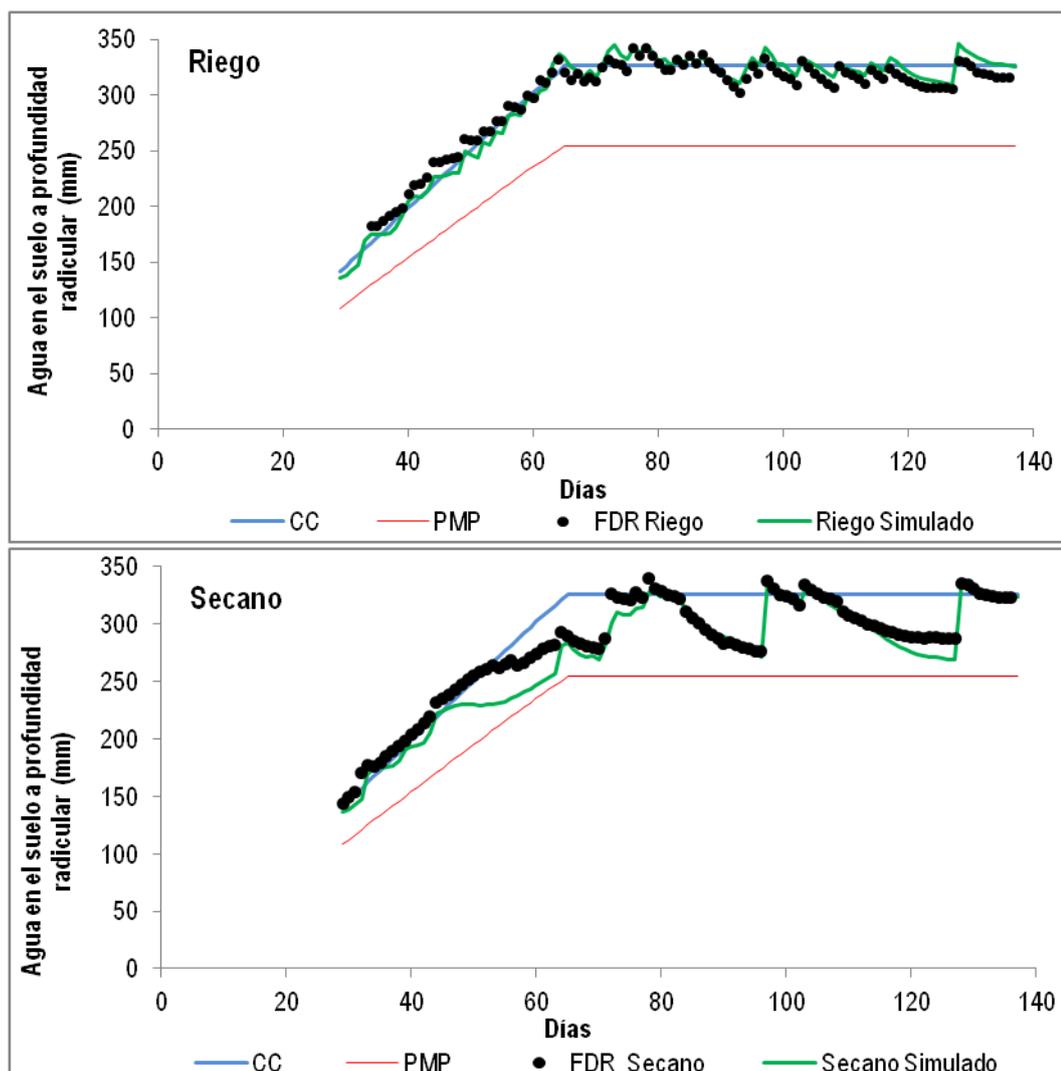
<b>Símbolo</b>	<b>Fenología y características del cultivo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valor</b>	<b>Origen</b>
T base	Temperatura base	1	5	r
T superior	Temperatura superior	1	30	r
<b>Desarrollo de la canopia</b>				
CC0	Cobertura inicial de la canopia	1	1,90	e
	Número de planta por hectáreas	2	380000	m
	Tiempo de siembra a emergencia (días)	2	7	m
CGC	Coefficiente de crecimiento de la canopia	1	9,1	c
CCx	Máxima cobertura alcanzada	2	99	m
	Tiempo de siembra a comienzo de senescencia	2	112	m
<b>Floración</b>				
	Tiempo de siembra a floración	2	59	m
	Duración de la floración	2	25	m
<b>Desarrollo radicular</b>				
Zn	Mínima profundidad radicular (m)	2	0,2	m
Zx	Máxima profundidad efectiva radicular	2	60	m
<b>Traspiración del cultivo</b>				
Kctx	Coefficiente de traspiración del cultivo	1	1.1	r
<b>Productividad del agua</b>				
WP*	Productividad de agua normalizada por ET <sub>o</sub> y CO <sub>2</sub> (g .m <sup>-2</sup> )	1	15	r
<b>Índice de cosecha</b>				
Hio	Índice de cosecha de referencia	2	45	e
	Posibilidad de incremento Hio por estrés antes de la floración	1	chico	r
	Coefficiente que describe el impacto de restricción del crecimiento vegetativo en la formación del rendimiento	1	nulo	r
	Coefficiente que describe el impacto negativo del cierre de estomas en la formación del rendimiento	1	fuerte	r
	Incremento máximo del índice de cosecha especificado	1	10	r
<b>Estrés hídrico</b>				
Pexp ,lower	Umbral superior expansión de la canopia	1	0,18	c-r
Pexp ,upper	Umbral inferior expansión de la canopia	1	0,65	c-r
	Factor de curvatura para la expansión de la canopia	1	3	c-r
Psto	Umbral superior para la regulación estomática	1	0,55	c-r
	Factor de curvatura para el control estomático	1	3	c-r
P sen	Umbral superior para senescencia	1	0,7	c-r
	Factor de curvatura para senescencia	1	3	c-r
P pol	Umbral superior para fallas en polinización	1	0,8	c-r

\*(c) calibrado, (r) extraído de la bibliografía, (e) estimado, (m) medido en campo.



**Figura 3.** Evolución de la cobertura de la canopia, de la biomasa y del rendimiento en los tratamientos con riego y secano. Valores observados (● Obs Riego= observados con riego, ○ Obs Secano= observados sin riego) y valores simulados (— Sim Riego= simulado con riego, — Sim Secano= simulado sin riego) con el modelo Aquacrop para el cultivar de soja NA 6448. A) Cobertura de la canopia, Cobertura (%)= porcentaje de suelo cubierto por la canopia. B) Biomasa aérea sobre el suelo en toneladas de materia seca por hectárea (MS t. ha<sup>-1</sup>). C)

Rendimiento de granos secos en toneladas por hectáreas ( $t\ ha^{-1}$ ). Días= días desde la siembra. Barras corresponden a desvío estándar,  $n=18$ .



**Figura 4.** Evolución del contenido de agua en el suelo para el cultivar de soja NA 6448 con riego (Riego) y sin riego (Secano). ● FDR Riego, ● FDR secano = valores observados registrados con sensores FDR en milímetros. —Riego Simulado, —Secano Simulado = valores estimados por el modelo Aquacrop en milímetros. —CC= volumen de agua en el suelo a capacidad de campo en milímetros, —PMP= volumen de agua en el suelo a punto de marchitez permanente en milímetros. Días= días después de siembra.

**Cuadro 3.** Pruebas de desempeño del modelo para los valores estimados por el modelo Aquacrop y valores observados en el cultivar de soja NA 6448 en dos regímenes hídricos, con riego (Riego) y sin riego (Secano). Cobertura= cobertura de la canopia en porcentaje de suelo cubierto. Biomasa= materia seca del cultivo sobre el suelo. Rendimiento= rendimiento en grano cosechado. Agua= contenido de agua en el suelo.

		n	r <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	EF	d
Cobertura (%)	Riego	9	0,98	4,84	6,07	0,95	0,98
	Secano	9	0,96	6,31	9,10	0,93	0,96
Biomasa	Riego	8	0,92	1,29	37,59	0,81	0,91
	Secano	8	0,95	0,77	21,37	0,93	0,96
Rendimiento	Riego	4	0,97	0,35	12,89	0,95	0,97
	Secano	4	0,99	0,22	8,45	0,97	0,98
Agua	Riego	63	0,81	11,22	3,44	0,80	0,89
	Secano	63	0,92	17,33	5,60	0,88	0,95

n= repeticiones, r<sup>2</sup>= coeficiente de determinación, EF= eficiencia del modelo, RMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error. NRMSE= raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado. d= índice de concordancia de Willmott's.

## Discusión

### Rendimiento y componentes

En la etapa inicial del cultivo de soja se encontró un mayor crecimiento de la canopia en los manejos previo de paraplow y trigo con respecto al manejo de raigrás. Luego este efecto se pierde en etapas posteriores del cultivo. Este mayor crecimiento inicial no se tradujo en diferencias en producción, en biomasa y tampoco en rendimientos en granos.

El cultivo con riego presentó mayor rendimiento en granos que el cultivo sin riego. El riego le permitió al cultivo mayor cobertura y mayor producción de biomasa que resultó posteriormente en un mayor rendimiento. El aumento del rendimiento respondió principalmente a aumento del número de granos por superficie (cuadro 1). En el período comprendido entre R4 y R6 (período crítico), se define el número de granos por unidad de área y el peso de los granos. El componente de mayor contribución en el rendimiento es el número de granos, cualquier factor que afecte el crecimiento del cultivo en este período

provocará reducción en el rendimiento <sup>(10)(25)(29)(30)</sup>. Se observó mayor número de vainas por unidad de superficie en los tratamientos regados, pero este aumento no alcanzó a ser significativo. El régimen hídrico no alteró el peso de los granos del cultivo.

El riego permitió la generación de un mayor potencial y concreción del rendimiento que el secano, concordando con lo reportado por varios autores <sup>(10)(7)(31)</sup>. A pesar de que fue un año con precipitaciones abundantes, en secano se identificaron tres períodos de déficit hídrico (antes de floración, en elongación de vainas y llenado de granos). El rendimiento en grano bajo riego fue de 30 % superior al secano. En Uruguay, se obtuvieron respuestas superiores a la observada entre cultivos con y sin riego. La respuesta al riego en el cultivo de soja es variable según las condiciones ambientales de cada año <sup>(10)(7)</sup>. El aumento del peso de los granos no provocó aumentos en el rendimiento ( $r^2= 0,12$ ), el coeficiente de determinación obtenido fue bastante menor al ( $r^2 = 0,31$ ) reportado por Kantolic <sup>(34)</sup>. Como el peso del grano depende de la tasa de crecimiento y de la duración del llenado, éstos están gobernados genéticamente y pueden ser modificados por condiciones ambientales <sup>(33)</sup>.

La diferencia en el rendimiento entre cultivares se relacionó positivamente con la biomasa aérea acumulada ( $r^2= 0,91$ ) y con el número de granos por unidad de área ( $r^2= 0,95$ ). El aumento en el número de granos por superficie estuvo explicado por la combinación del número de vainas y número de granos por vainas que logró llenar cada cultivar, el número de granos promedio por vainas fue 1,3; 2,3; 2,3 para NA 5009, NA5509, NA6448, respectivamente. Durante la siembra se define el rendimiento potencial de cada cultivar en el ambiente <sup>(12)(13)(14)(34)</sup>. Cada cultivar tiene requerimientos específicos de temperatura y fotoperíodo que definen la inducción floral y largo de los estados fenológicos posteriores a la floración. La interacción del cultivar con condiciones ambientales desde R3 a R6 resultó en diferencias en el rendimiento en cada cultivar.

El aumento del rendimiento se relacionó positivamente con la extensión del ciclo en cada cultivar. Diferiendo con los resultados encontrados en el sur de Uruguay <sup>(7)</sup>, donde el rendimiento no se asoció a la longitud del ciclo. No existe una relación directa y positiva entre la longitud del ciclo y el rendimiento potencial <sup>(34)(35)(36)</sup>. En zonas templadas por lo general los cultivares de ciclo más largo tienden a rendir menos que cultivares de menor ciclo asociado a un menor índice de cosecha <sup>(31)</sup>.

El peso de mil granos fue mayor en el cultivar que presentó menor número de granos por superficie (NA 5009). El cultivo de soja puede compensar en parte las reducciones en un componente del rendimiento debidas a estrés, aumentando el componente subsiguiente una vez desaparecido el estrés <sup>(37)(38)</sup>. El cultivar NA 5009 presentó mayor peso de granos a causa de que tuvo que llenar menos granos por unidad de área.

### **Ajuste y evaluación del rendimiento del modelo**

El modelo Aquacrop simuló con buena precisión la evolución de la cobertura verde de la canopia especialmente en el cultivo con riego, respecto a los datos observados (figura 3). Con riego se obtuvo mejor ajuste de la cobertura que en secano. El procedimiento de calibración consistió en el ajuste de los parámetros en condiciones óptimas <sup>(39)</sup>. Luego a través del cambio en los parámetros se limitó el crecimiento foliar hasta llegar a simular el crecimiento en las condiciones propias de cada situación <sup>(40)</sup>, este procedimiento determino el mejor ajuste en cobertura bajo riego.

En secano los valores simulados de la cobertura (figura 3) se ubicaron por debajo de los valores observados en el intervalo comprendido entre los 60 y 80 días posteriores a la siembra del cultivo. Causado por un período de estrés que afectó al cultivo a partir de los 50 días después de la siembra y duró aproximadamente 20 días. El modelo subestimó la cobertura en los tratamientos de secano, lo que coincide con los trabajos reportados para soja en Uruguay <sup>(16)(17)</sup>. El modelo Aquacrop también ha presentado dificultades en la simulación de la cobertura en condiciones hídricas limitantes en maíz <sup>(20)</sup>. Una mala estimación de la cobertura ocasionará estimaciones con errores en las demás variables debido a las bases de funcionamiento del modelo <sup>(15)</sup>, como ser la transpiración, y la biomasa.

La biomasa aérea acumulada simulada por el modelo (figura 3) concuerda con los valores obtenidos en campo en la etapa inicial y final. La biomasa total acumulada estimada por el modelo sin limitantes hídricas fue de 495 kg de MS ha<sup>-1</sup> superior a la observada bajo riego. En secano, la biomasa simulada en superó en 242 kg de MS ha<sup>-1</sup> a la observada. En la etapa intermedia (60 y 80 días pos siembra) se observó mayor diferencia entre valores observados y simulados por el modelo. Posiblemente causada por la variación de los resultados observados en el campo en esta variable y por sobreestimación del modelo al inicio de la etapa de crecimiento lineal del cultivo. El modelo simula muy bien el rendimiento

de los cultivos herbáceos en respuesta al agua <sup>(39)</sup>, pero por sus características propias de funcionamiento no logra acompañar la producción en biomasa en alternancia de déficit hídrico en el cultivo de soja.

En el rendimiento de granos se alcanzaron los valores objetivos de los indicadores de desempeño del modelo sugeridos Raes y otros <sup>(28)</sup>. Se obtuvo una buena representación en el rendimiento en granos en la cosecha, con una diferencia entre el rendimiento en granos estimado y observado de 35 y 344 kg ha<sup>-1</sup> en riego y seco respectivamente. Las discrepancias observadas entre valores simulados y observados en la evolución del rendimiento, fueron causadas por la dificultad en la determinación de esta variable en el campo y falta de sensibilidad del modelo a cambios en la duración de etapas fenológicas frente a eventos de estrés.

Los indicadores estadísticos demuestran un buen desempeño del modelo en las variables biomasa, cobertura, rendimiento en granos y contenido de agua en el suelo. Los valores alcanzados en los indicadores son similares a los presentados por algunos autores en trabajos de calibración y validación en el cultivo de soja <sup>(16)(18)</sup>. En el contenido de agua en el suelo se obtuvo valores de ajuste equivalentes a los reportados por Giménez y otros <sup>(17)</sup> para el modelo Aquacrop en soja en el área de Paysandú.

El modelo logró simular satisfactoriamente la biomasa y rendimiento de los tres cultivares. Se destacó la concordancia de los valores simulados en la cobertura de la canopia del cultivo con riego, en cambio en el cultivo en seco, los índices mostraron un débil ajuste en el cultivar NA 5009 (NRMSE=24,74, EF= 0,60, d =0,78). La biomasa del cultivo producida sobre el suelo no fue bien representada por el modelo, explicado en parte, por la variación en valores observados en el campo en los diferentes registros.

En la estimación del rendimiento en granos, la estimación no fue aceptable en el cultivar de ciclo más corto (NA 5009) en seco, con una eficiencia de 0,04 y un índice de concordancia de 0,75. En general los valores de los índices de desempeño del modelo calculados para el rendimiento en grano, indican menor ajuste del modelo en la medida que el ciclo del cultivar se aleja del cultivar que fue calibrado (NA6448). Debido fundamentalmente a que en el modelo solo se pueden corregir los factores relacionados a la duración del ciclo y

en el campo entran en juego factores genéticos y de adaptación fisiológica que establecen diferencias en el rendimiento incluso en cultivares de igual duración del ciclo <sup>(41)</sup>.

## **Conclusiones**

El riego permitió que el cultivo de soja logró mayor cobertura del suelo y biomasa, lo que resultó en mayor rendimiento en granos.

En la medida que el ciclo del cultivar es más largo, mantiene la cobertura verde máxima por más tiempo, logrando mayor biomasa y mayor rendimiento en granos.

Las diferencias en rendimiento en todas las condiciones estuvieron asociadas al mayor número de granos por unidad de superficie. El peso de los granos no se relacionó directamente con el aumento del rendimiento en ningún caso. El número de vainas por metro cuadrado no presentó diferencias significativas entre los cultivares. Las diferencias en rendimiento entre los cultivares fue causada por el aumento en el número de granos por vainas que logró alcanzar cada material.

El modelo Aquacrop es una buena herramienta de gestión y programación del riego que permite la simulación de la biomasa y el rendimiento en granos, así como también llevar a cabo un balance diario de agua en el suelo en el cultivo de soja para las condiciones del noroeste de Uruguay.

El modelo Aquacrop permitió discriminar entre los tres cultivares en condiciones sin limitantes hídricas, en cambio en seco se observó una sobreestimación en cobertura, biomasa y rendimiento en granos en los cultivares que no fueron calibrados.

## Referencias

- 1) MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias). Anuario Estadístico Agropecuario. Montevideo: MGAP; 2016. 179 p.
- 2) Blum A. Caracterización del cultivo de soja y de su complejo agroindustrial. In: Blum A, Narbondo I, Oyhantcabal G, Sacho D, editors. Soja transgénica y sus impactos en Uruguay la nueva colonización. Montevideo: Rosgal S.A; 2008. p. 9-56.
- 3) Arbeletche P, Gutiérrez, G. Crecimiento de la agricultura en Uruguay: exclusión social o integración económica en redes. Pampa (Santa Fe). 2010;(6), 113-138.
- 4) Castaño J, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R. Caracterización Agroclimática del Uruguay – 1980-2009. Serie Técnica INIA. Montevideo; 2011. V. 193, 34p.
- 5) Molfino J, Califra A. 2001. Agua disponibles de las tierras del Uruguay. División Suelos y Aguas Dirección General de Recursos Naturales Renovables Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca; 2001. 13 p.
- 6) Martino D. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistema de siembra directa. Colonia, INIA; 1999. p. 225-257.
- 7) Sawchik, J. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono sur. Programa cooperativo para el desarrollo tecnológico agroalimentario y agroindustrial del cono sur; 2006. p. 165-170.
- 8) Giménez L, García Petillo M. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. Agrocienza Uruguay. 2011; 15(2), 100–108.
- 9) Otero O, Montoya F, García C. Programación del riego. Serie técnica INIA 232; 2017. p.68.
- 10) Giménez L. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja Effect of Water Deficiencies at Different Stages of Development on Soybean Yield. 2014; 1, 53–64.
- 11) Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuesta de invierno; 2016. 19 p.
- 12) Ovando G, Sayago S, Salvagiotti F. Estimación del rendimiento de soja con datos de radiación solar de CERES. 2017. p. 20–32.
- 13) Giorda M, Baigorri H. El cultivo de la soja en Argentina .INTA.C.R Córdoba; 1997. p.448.

- 14) Mandl F. Tipo de cultivares y época de siembra. In. Girasol y Soja: algunos aspectos tecnológicos de producción para el litoral oeste de Uruguay. Giménez A, Restaino E, editores. Boletín de Divulgación INIA, N° 47; 1994. p. 105-108.
- 15) Steduto P, Hsiao T, Raes D, Fereres E. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 2009;101(3): 426–437.
- 16) Montoya F, García C, Pintos F, Otero A. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. *Agric. Water Manag*; 2017; 193: 30–45.
- 17) Giménez L, Paredes P, Pereira L S. Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models. *Water (Switzerland)*; 2017;9(6).
- 18) Abi Saab MT, Albrizio R, Nangia V, Karam F, Roupheal Y. Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with Aquacrop. *Int. J. Plant Prod* 2014; 8(4): 457–482.
- 19) Morla F, Giayetto O. Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano De La Ciencia Del Suelo; 2012.
- 20) De la Casa C. Monitoreo de cultivos de maíz y estimación de rendimiento a nivel de lote con datos de aqua-modis en Córdoba, Argentina. Tesis Doctor en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba. 2011. 284p.
- 21) Hsiao T, Heng C, Steduto L, Rojas-Lara P, Raes B, Fereres D. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 2009; 101(3), 448–459.
- 22) Montoya F. Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis Doctoral de Ingeniería Agrónoma. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete. España; 2013. 270p.

- 23) Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. 298p.
- 24) Blake G, Hartge K. 1986. Bulk Density. En: A Klute (eds.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Wisconsin: Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison. 363- 375.
- 25) Fehr W, Caviness C, Burmood D, Pennington J. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. Crop Science.1971; V. 2, p. 929-932.
- 26) Easlou H, Bloom A. Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis for Rapid and Accurate Measurement of Leaf Area. Applications in Plant Sciences. 2014; 2(7).
- 27) Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo C. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- 28) Raes D, Steduto P, Hsiao T, Fereres E. AquaCrop Reference Manual, Roma, FAO; 2017.
- 29) Álvarez C. Rendimiento de cultivares de soja de grupo de madurez v y vi con riego complementario. tesis de grado. universidad nacional de rio cuarto facultad de agronomía y veterinaria. 2010. 41p.
- 30) Andriani, J, Andrade F, Suero E, Dardanelli J. Water deficits during reproductive growth of soy beans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. Agronomy. 1991; Cap.11, p. 737-746.
- 31) Terra J, Cantou G, Oxley M, Furtado I, Bordagarri A, Sawchik J. Potencial productivo del cultivo de soja sin limitantes de agua. Serie de actividades de difusión, 713; 2012. p. 19–21.
- 32) Villasuso N. Estrategias de crecimiento y generación del rendimiento potencial en ocho genotipos de soja (*glycine max* (l.) merr) que difieren en su grupo de madurez. Universidad Nacional de Villa María IAP Ciencias Básicas y Aplicadas; 2015. 44 p.
- 33) Kantolic A, Giménez I, De la fuente E. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en soja; En: Satorre E. H. et al. Edición: Producción de Granos: Base funcionales para su manejo. FAUBA; 2004. p. 167-201.
- 34) Kantolic A. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de Soja: Impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. Revista Facultad de Agronomía UBA; 2008. 28(1), 63–88.

- 35) Ceretta S, Vilaro D. Adaptación de cultivares de soja en Uruguay. Serie de Difusión, 297; 2002. P. 44–52.
- 36) Baigorri. Desarrollo y crecimiento de cultivares de soja en función de la fecha de siembra y su importancia en la recomendación de manejo. In. Jornada nacional de soja. Serie Actividades de Difusión INIA, 325; 2003. p. 101-113.
- 37) Morandi, E; Bodrero, M; Martignone, R y Quijano A. Respuesta de distintos genotipos de soja a la época de siembra y a la disponibilidad hídrica. Evolución, Actas de la Primera Reunión Nacional de Oleaginosos, Rosario; 1991. P. 89-95.
- 38) Bodrero M. Algunos factores genéticos y ambientales que influyen sobre el rendimiento de la soja. In: Jornada Nacional de la Soja). Montevideo, Actividades de Difusión, 325; 2003. p. 1-13.
- 39) Steduto P, Hsiao T, Fereres E, Raes D. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Riego y Drenaje (Vol. 66). 2012.
- 40) Raes D, Steduto P, Hsiao T, Fereres E. AquaCrop--The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. Agronomy Journal. 2009; 101: 438-447.
- 41) Castro M, Cuitiño M, Manasliski S, Morales X, Cardozo V. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de Soja. Unidad de comunicación y transferencia de tecnología INIA la Estanzuela; 2017.