

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE
SIMULACIÓN CROPSYST PARA DOS CULTIVARES
DE SOJA Y GIRASOL EN EL LITORAL OESTE DE
URUGUAY**

por

Guillermo ARRÚA CURBELO

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2013**

Tesis aprobada por:

Directores:

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Luis Giménez

Fecha: 19 de julio de 2013

Autor: -----
Guillermo Arrúa Curbelo

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Gastón y Mary, a los que estaré eternamente agradecido por todo su esfuerzo.

Al Ing. Agr. Sebastián Mazzilli, tanto por lo aprendido como por su predisposición y apoyo desde el primer momento.

A todos los funcionarios de la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni”, en especial al Sr. Dario Frost.

A todos los compañeros y amigos que me ayudaron a sobrellevar mis “ires y venires” para la culminación de este trabajo.

4.3.3 <u>Índice de área foliar</u>	28
4.3.4 <u>Acumulación de nitrógeno</u>	30
4.4 RESULTADOS CALIBRACIÓN.....	31
4.4.1 <u>Rendimiento y biomasa a cosecha</u>	36
4.4.1.1 Soja.....	36
4.4.1.2 Girasol.....	37
4.4.2 <u>Índice de área foliar, acumulación de nitrógeno,</u> <u>y contenido de agua en el suelo</u>	39
4.4.2.1 Soja.....	39
4.4.2.2 Girasol.....	42
4.5 RESULTADOS VALIDACIÓN.....	45
4.5.1 <u>Rendimiento y biomasa a cosecha en soja</u>	45
4.5.2 <u>Índice de área foliar, acumulación de nitrógeno,</u> <u>y contenido de agua en el suelo en soja</u>	47
4.5.3 <u>Validación potrero 27</u>	49
4.6 CONTRASTE DE FECHAS DE SIEMBRA.....	50
5. <u>CONCLUSIONES</u>	57
6. <u>RESUMEN</u>	59
7. <u>SUMMARY</u>	60
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	61
9. <u>ANEXOS</u>	66

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Textura, materia orgánica, y capacidad de almacenaje de agua de las tres zonas topográficas dentro de las parcelas experimentales.....	23
2. Rendimiento en grano, biomasa a cosecha e, índice de cosecha para ambos cultivares de soja en los dos períodos de ensayo. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.	25
3. Rendimiento en grano, biomasa a cosecha e, índice de cosecha para ambos cultivares de girasol en los dos períodos de ensayo. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.	26
4. Parámetros genéticos relevantes de soja. Valores por default y modificaciones realizadas en la calibración de los cultivares.	31
5. Parámetros genéticos relevantes de girasol. Valores por default y modificaciones realizadas en la calibración de los cultivares.	34
6. Resultados del ajuste de la calibración del rendimiento y biomasa a cosecha en soja. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.	36
7. Resultados del ajuste de la calibración del rendimiento y biomasa a cosecha en girasol. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.	37
8. Resultados del ajuste de la calibración de absorción de nitrógeno, contenido de agua hasta 30 cm, a más de 30 cm y total, en soja. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.	39
9. Resultados del ajuste de la calibración del IAF, absorción de nitrógeno, contenido de agua hasta 30 cm, a más de 30 cm y total, en girasol. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.	42

10. Resultados del ajuste de la validación del rendimiento y biomasa a cosecha en soja. Promedio de puntos de muestreo.	45
11. Resultados del ajuste de la validación del IAF, contenido de agua hasta 30 cm, y a más de 30 cm, en soja. Promedio de puntos de muestreo.....	47
12. Resultados del ajuste de la validación del rendimiento, biomasa a cosecha, e índice de cosecha, en soja. Promedio de puntos de muestreo de tres años	49

Figura No.

1. Precipitación acumulada y temperatura promedio del período experimental 2009-2010 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.	20
2. Precipitación acumulada y temperatura promedio del período experimental 2010-2011 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.	21
3. Radiación solar del período experimental 2009-2010 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.	22
4. Radiación solar del período experimental 2010-2011 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.	22
5. Rendimiento en grano y biomasa a cosecha según época de siembra en soja. Promedio de puntos de muestreo de cada época y cultivar. Período 2010-2011.....	24
6. Rendimiento en grano según época de siembra en girasol. Promedio de puntos de muestreo de cada época y cultivar. Períodos 2009-2010 y 2010-2011.....	26
7. Milímetros de agua hasta 30 cm de suelo (a), y a más de 30 cm (b), según estadio fenológico para diferentes épocas de siembra. Promedio de cultivares y puntos de muestreo para ambos períodos experimentales.	27

8. Figura No.8: Índice de área foliar según estadio fonológico para época de siembra temprana (1), intermedia (2), y tardía (3). Promedio de puntos de muestreo para el período 2009-2010 (a y b), y 2010-2011 (c).	29
9. Acumulación de nitrógeno en planta a diferentes estadios fenológicos para época de siembra temprana (1), intermedia (2), y tardía (3). Promedio de puntos de muestreo del período 2010-2011 (a y b), y período 2009-2010 (c)	30
10. Lineal 1:1 para la calibración del rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha). Cultivar A 6411 (a), y DM 5.1 i (b).....	36
11. Lineal 1:1 para la calibración del rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha). Cultivar MG 52 (a), y DK 3940 (b).....	38
12. Lineal 1:1 para la calibración de la absorción de nitrógeno (a), contenido de agua hasta 30 cm (b), a más de 30 cm (c), y total (d); en diferentes estadios fenológicos y diferentes fechas de siembra. Cultivar A 6411 (izquierda) y DM 5.1 i (derecha).....	40
13. Biomasa a cosecha y concentración de nitrógeno en planta a cosecha, observada y simulada, para ambos cultivares en sus tres fechas de siembra. Período 2010-2011.....	42
14. Lineal 1:1 para la calibración del índice de área foliar (IAF) (a), absorción de nitrógeno (b), contenido de agua hasta 30 cm (c), a más de 30 cm (d), y total (e); en diferentes estadios fonológicos y diferentes fechas de siembra. Cultivar MG 52 (izquierda) y DK 3940 (derecha).	43
15. Lineal 1:1 para la validación del rendimiento, cultivar A 6411 (a), DM 5.1 i (b); y biomasa a cosecha, cultivar DM 5.1 i (c).....	46
16. Lineal 1:1 de la validación del índice de área foliar (a), contenido de agua hasta 30 cm (b), y a más de 30 cm (c), a diferentes estadios fonológicos. Cultivar A 6411 (izquierda) y DM 5.1 i (derecha).....	47

17. Lineal 1:1 para rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha), en soja. Cultivar A 6411.....	50
18. Rendimiento simulado en 10 años consecutivos de siembra para tres fechas de siembra diferente sobre suelos de 1 m, cultivar A 6411 (a), y DM 5.1 i (b); y sobre suelos de 0.5 m, cultivar A 6411 (c), y DM 5.1 i (d).....	50
19. Rendimientos obtenidos y lluvias acumuladas en el período R3-R6 en años con rendimientos extremos sobre suelos de 1m de profundidad. a) Cultivar A6411 y b) DM 5.1 i.	52
20. Rendimientos obtenidos y lluvias acumuladas en el período R3-R6 en años con rendimientos extremos sobre suelos de 0.5m de profundidad. a) Cultivar A6411 y b) DM 5.1 i.	54
21. Probabilidades de no ocurrencia de determinado rendimiento según fecha de siembra sobre suelos de 1 m de profundidad, cultivar A 6411 (a), y DM 5.1 i (b); y sobre suelos de 0.5 m, cultivar A 6411 (c), y DM 5.1 i (d).	55

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para entender la complejidad que caracteriza los sistemas ecológicos y ambientales. Son la única herramienta disponible para traducir una colección de hipótesis acerca de procesos ecológicos en una representación de cómo el ecosistema funciona en su totalidad. Permiten realizar análisis de impactos tecnológicos, económicos y ambientales, la evaluación de estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento de los cultivos (Hernández et al., 2009).

Un modelo de crecimiento del cultivo validado es una herramienta útil para ayudar a determinar las prácticas óptimas de manejo (Jones y Ritchie, 1990), pero la fiabilidad de estos modelos de simulación puede ser evaluada únicamente a través de procesos de validación con datos de experimentos de campo (Pala et al., 1996). La falta de parámetros genéticos, o la calibración y validación, son elementos que limitan el uso de este tipo de herramientas. En Uruguay son varias las experiencias en el uso de modelos de simulación, y se pueden estudiar ejemplos de uso de los modelos Ceres en cebada cervecera (Romero, 1995), en maíz (Sawchick, 1995), el modelo Century estimando la evolución del contenido de carbono de suelos agrícolas (Baethgen 1993, Baethgen et al. 1994, Baethgen y Morón 2000), y en conjunto con suelos ganaderos (Morón, 2009). Recientemente se han llevado a cabo algunos trabajos tendientes a calibrar y validar CropSyst en trigo, maíz, y soja con resultados no siempre satisfactorios (Baroffio y Ramos 2009, Berrutti 2009, D’Otonne 2010).

Enmarcados en un nuevo escenario de expansión agrícola, contar en nuestro país con una herramienta confiable, útil para investigadores, técnicos, y desarrolladores de políticas, que permita la reproducción y diseño de múltiples escenarios productivos a nivel experimental y comercial, y sus consecuencias a nivel económico y ambiental, es de vital importancia.

La hipótesis de trabajo planteada es que será posible estimar adecuadamente el crecimiento y desarrollo de dos cultivares por especie de girasol y soja utilizando el modelo CropSyst. Los objetivos planteados en este trabajo son obtener los parámetros genéticos de dichos cultivares de forma que puedan ser usados en el modelo para evaluar distintas alternativas de manejo del cultivo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESCRIPCIÓN DE CROPSYST

CropSyst (Stöckle y Nelson, 1998), es un modelo de simulación del crecimiento y rendimiento de una serie de cultivos agrícolas. Permite operar sobre diferentes cultivos extensivos durante varios años, mediante un intervalo de ejecución diario, simulando el balance de agua y nitrógeno en el suelo, la fenología del cultivo, la absorción de agua y nitrógeno, la interceptación de radiación por parte de la cubierta vegetal, el crecimiento y desarrollo del área foliar, la producción de biomasa y el rendimiento final, así como la producción y descomposición de residuos de cultivo y la erosión del suelo. CropSyst permite seleccionar cultivos y variedades, la rotación (incluyendo periodos de barbecho), riego, fertilización nitrogenada, tipo de laboreo y manejo de residuos. Además, permite realizar análisis de impacto ambiental en cuanto a erosión del suelo, lixiviación y cambio climático.

En el centro de cualquier modelo de crecimiento de cultivos, hay un conjunto de ecuaciones para las estimaciones de la tasa de producción de biomasa a partir de recursos captados, como el dióxido de carbono, la radiación solar, y agua (Azam Ali et al., 1994). En el caso de CropSyst, estas ecuaciones se encuentran en el manual del modelo (Stöckle et al., 2000) y recientemente fueron resumidas a nivel local en dos trabajos de tesis de grado de la UdelaR (Baroffio y Ramos 2009, Berrutti 2009).

El modelo utiliza alrededor de 40 parámetros de cultivo para simular la tasa de producción de biomasa. El desarrollo del cultivo se simula sobre la base del tiempo térmico acumulado necesario para alcanzar cada etapa fenológica. El modelo da cuenta de cuatro posibles factores limitantes para el crecimiento de los cultivos: la interceptación de radiación, el agua, la absorción de N y la temperatura. El crecimiento diario del cultivo se basa en dos enfoques diferentes: (i) crecimiento de biomasa dependiente de la radiación, basado en la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo, y (ii) crecimiento de la biomasa dependiente de la transpiración, basándose en la estimación del potencial de transpiración de los cultivos (Stöckle 2003, Todorovic et al. 2009). Según el primer enfoque, CropSyst simula la producción diaria de biomasa sobre el suelo mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{AGB_{IPAR} = RUE \times IPAR \times T_{lim}}$$

Donde:

AGB_{IPAR}: Crecimiento diario de biomasa aérea dependiente de la radiación fotosintéticamente activa interceptada.

RUE: Eficiencia de uso de la radiación, es el factor de conversión de la luz en biomasa por encima del suelo.

T_{lim}: Factor limitante de la temperatura.

IPAR: Radiación fotosintéticamente activa interceptada.

De acuerdo con el segundo enfoque, CropSyst simula la producción diaria de biomasa sobre el suelo mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{AGB_T = T_{act} \times BTR / VPD}$$

Donde:

AGB_T: Crecimiento dependiente de la transpiración.

T_{act}: Transpiración actual.

BTR: Coeficiente de transpiración de la biomasa aérea.

VPD: Déficit medio diario de presión de vapor.

Por lo tanto en CropSyst, la tasa de producción de biomasa es simulada por la captura de radiación o agua, dependiendo del factor más limitante entre ellos. La transpiración se supone que es igual a la absorción de agua, que es una función del suelo, el potencial de agua de la hoja, y la conductancia de la raíz. El balance de agua en el suelo incluye la precipitación, el riego, la escorrentía, la infiltración del agua y la redistribución en el perfil del suelo, la transpiración del cultivo, y la evaporación del suelo.

La evapotranspiración de referencia es estimada ya sea por el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) o por la ecuación de Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) en función de la disponibilidad de datos meteorológicos. El crecimiento limitado por agua se calcula utilizando los parámetros que limitan directamente la acumulación de biomasa, incluyendo la proporción real de la evapotranspiración potencial, el potencial hídrico de las hojas que inducen el cierre de estomas y el marchitamiento, y la sensibilidad fenológica al estrés hídrico.

El rendimiento limitado por agua se calcula utilizando los parámetros que afectan el rendimiento a través de la limitación de la asimilación de la translocación, al igual que la sensibilidad al estrés hídrico durante la floración y en la madurez (Stöckle y Nelson 2000, Stöckle et al. 2003).

El rendimiento del cultivo se calcula multiplicando la biomasa total en la cosecha por un IC (índice de cosecha) (Stöckle y Nelson, 2000). En CropSyst, el IC se determina tomando como base un IC no estresado modificado de acuerdo a la intensidad del estrés (agua y N) y la sensibilidad del cultivo al estrés durante la floración y el llenado del grano.

2.2 EXPERIENCIAS PREVIAS

Son muchos los trabajos que se han desarrollado con propuestas similares a las de éste, haciéndose ajustes en diversos cultivos y regiones. Las experiencias de trabajo enfocadas al ajuste y análisis de la performance de CropSyst que se encuentran publicadas para cultivos como maíz y trigo son abundantes, para el caso particular de girasol y soja, estas experiencias son más escasas. Menor aún es la información cuando consideramos experiencias de trabajo en climas templados como el de nuestro país, dado que la mayoría de la información procede de países europeos de clima mediterráneo.

A continuación se resumen resultados y problemáticas surgidas en diferentes trabajos en los cuales se ha calibrado y validado el modelo para alguno de estos cultivos. El rendimiento en grano es la variable de mayor frecuencia a la hora de validar el ajuste del modelo en los diferentes trabajos, a excepción de un trabajo de tesis, en soja, es la única variable que se validó en un reducido número de trabajos que se encontraron en la bibliografía. La producción de biomasa y el contenido de agua en el suelo son otras variables que generalmente se consideran a la hora de validar el modelo, en girasol se citan algunas experiencias con estas variables.

Las técnicas de evaluación del modelo en los diferentes experimentos incluyen diferentes índices. El indicador del desempeño del modelo más comúnmente utilizado es la relación de la raíz cuadrada media del error, RCME (%) (una indicación de la relación de la magnitud del error), la forma de cálculo del mismo se detalla en el siguiente capítulo de este trabajo. Se utilizan diferentes criterios a la hora de clasificar los valores obtenidos en este índice, uno de ellos es el de Jamieson et al. (1991), que consideran la simulación excelente si el valor obtenido es menor de 10%, buena si está entre 10-20%, justa si está entre 20-30%, y pobre si es mayor a 30%. Algunos trabajos incluyen el análisis de correlación (r^2).

2.2.1 Antecedentes en soja

Con el fin de verificar la aplicabilidad del modelo CropSyst para evaluar la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático en Camerún (como una representación análoga de la región subsahariana de África central), Tiengem et al. (2008), calibraron el modelo para 5 cultivos diferentes, en ocho sitios agrícolas climáticamente diferentes, algunos de ellos, de Camerún.

En general, el esfuerzo de calibración se limitó a la utilización de datos que suelen estar disponibles para las aplicaciones del modelo en la región subsahariana. La misma se basó en los valores obtenidos a partir de los valores de la literatura, desde el manual de usuario de CropSyst, en base a la experiencia de los autores personales, y mediante la minimización de las diferencias entre los rendimientos reales y simulados para un número limitado de ensayos de simulación.

Para garantizar la fiabilidad de sus resultados de calibración, realizaron posteriormente una evaluación de los rendimientos de los cultivos simulados. La evaluación se basó en la diferencia relativa entre los promedios de los rendimientos observados y simulados ($DR \% = ([\text{observados simulado} / \text{observados}] \times 100)$). Se presentan tres sitios de estudio, en los que se validó Soja (*Glycine max* (L.)), también se incluyen datos de otros cultivos para observar la variación en este índice.

Bamenda, Ngaoundéré, y Tiko están a 1239, 1104, y 52 m de altura del nivel del mar, y el promedio de precipitación anual para cada uno de ellos es de 2378, 1514, y 3198 mm., respectivamente. Las diferencias relativas de la validación para un promedio de más de 50 años fueron las siguientes: Maíz: 0,1; -0,7; -1,9; Sorgo: -1,7 (Ngaoundéré); y Soja: -2,1; 2,2; -10,5, datos de Bamenda, Ngaoundéré, y Tiko, respectivamente.

Los resultados muestran que, a pesar de la limitada disponibilidad de datos de calibración, el modelo fue capaz de producir buenas estimaciones en los tres sitios. Los autores concluyen que las diferencias relativas de la validación se encuentran dentro de un rango que se considera aceptable.

Otra evaluación de la performance de CropSyst en la simulación del rendimiento de diferentes cultivos, en respuesta al agua y nitrógeno, en una sola temporada, y bajo condiciones experimentales, se resumen en un trabajo de Stöckle et al. (2003). En estos experimentos los tratamientos impuestos proporcionaron una gran variedad de condiciones, desde suelo seco a cultivos completamente regados, y desde condiciones de bajo nitrógeno, a bien abastecido.

Las comparaciones estadísticas de las respuestas observadas y simuladas a tratamientos de agua para el rendimiento de diferentes cultivos, se basaron en experimentos realizados en la localidad de Auzevielle (Francia). La relación de la RCME obtenida fue de: 21,3%; 11,8%; y 13,5%, entre datos simulados y observados para maíz, sorgo, y soja, respectivamente.

Los resultados obtenidos en este trabajo fueron satisfactorios, al igual que los de Tiengem et al. (2008), sin embargo en ensayos de larga duración, rotaciones de 4 años, con diferentes niveles de fertilización mineral y orgánica, usadas para evaluar el modelo en el norte de Italia, Berti et al. (2001), obtuvieron resultados satisfactorios para los sistemas generales evaluados, y para el trigo de invierno, el maíz y los cultivos de remolacha azucarera, mientras que la simulación de soja no fue satisfactoria. Por su parte, Ceotto et al. (1993), y más recientemente, Donatelli et al. (1997), utilizando datos de un experimento de sistemas de cultivo en el sur de Italia, han probado la capacidad para simular el rendimiento de grano por EPIC y CropSyst, respectivamente. Compararon varios cultivos herbáceos, sin tener en cuenta los tratamientos experimentales (año, rotaciones, el nivel de entrada de tecnologías), y obtuvieron resultados de simulación bastante exactos para sorgo y girasol, pero no tanto para trigo y soja.

El caso de Donatelli et al. (1997), utilizando CropSyst, el trabajo no solo contó con sistemas de cultivo en el sur de Italia (Foggia), sino también en Módena, al norte de ese país. Los datos experimentales se recogieron desde experimentos con diferentes rotaciones durante el periodo 1985-1991, y se utilizaron para calibrar y validar el modelo en cultivos como maíz, cebada, soja, sorgo, y girasol. Los rendimientos de maíz (r^2 0,68), soja (r^2 0,89), y cebada (r^2 0,62) en Módena, y el sorgo (r^2 0,67) y el girasol (r^2 0,63) en Foggia, fueron razonablemente exactos. Pero como se menciona anteriormente, el modelo no fue capaz de predecir los rendimientos de la soja, que fue incluida únicamente como cultivo de segunda (r^2 0,00), ni del trigo duro (r^2 0,01), en Foggia.

En general, los resultados de la simulación de Foggia fueron menos satisfactorios que los de Módena. La principal diferencia entre las rotaciones en los ambientes donde el agua es el factor limitante, tales como Foggia, es la cantidad de agua residual en el suelo (Roder et al. 1989, Rizzo et al. 1990, Di Bari et al. 1992). Así mismo, la formación de grietas en el suelo durante el verano, que llegan hasta un 1 m de profundidad (Di Bari y Rizzo, 1981), es un fenómeno común en estos suelos, que podría tener un efecto significativo sobre el balance de agua en el suelo que el modelo no lo contabiliza. Un trabajo realizado en el cultivo de girasol, por otros autores, y en esta misma región, hace referencia a este fenómeno, el mismo se cita en la siguiente sección de este capítulo.

Volviendo al trabajo, los experimentos de campo no fueron diseñados específicamente para proporcionar los datos para la validación del modelo, mas allá de una prueba global de los rendimientos, por lo tanto, algunas variables de interés faltaron (por ejemplo, índice de área foliar, biomasa, etc.) a lo largo de la temporada de crecimiento, lo que impidió las pruebas de la mayoría de los submodelos para explicar las discrepancias entre los datos medidos y simulados. Es por esto que los autores, más allá de estas hipótesis, carecen de una explicación del pobre desempeño del modelo en el caso de la soja, que se presentó únicamente como cultivo de segunda, en las rotaciones de la región de Foggia.

A nivel local, en su tesis de grado Baroffio y Ramos (2009), trabajaron en la calibración y validación de CropSyst para un cultivar de soja en las mismas condiciones de producción en las que se desarrolló este trabajo, el litoral-oeste de Uruguay. Obtuvieron buenos resultados en la calibración para las variables acumulación de biomasa aérea RCME (%) 14,5, dinámica de agua en el suelo RCME (%) 10, y rendimiento en grano RCME (%) 8, no así en el índice de área foliar RCME (%) 57,6. El ajuste en la estimación de la radiación interceptada por el cultivo fue buena RCME (%) 18, lo que explica según los autores el buen ajuste logrado en la biomasa aérea, como se vio en la sección anterior, la interceptación de radiación es uno de los dos enfoques en que se basa CropSyst para la estimación del crecimiento.

No obtuvieron buenos resultados en la validación del modelo, con diferencias importantes en la acumulación de biomasa, seguido de un mal ajuste en el índice de área foliar, diferencias mayores a 70 de la RCME (%), mal ajuste en radiación interceptada por el cultivo, y del rendimiento en grano RCME (%) 33.

La razón que adjudican a estos resultados, o que al menos dificultaría identificar debilidades propias del modelo, sería que la validación se realizó sobre suelos que presentaron una alta variabilidad edáfica entre puntos de muestreo en un mismo sitio, lo que pudo haber provocado imprecisiones en los muestreos de suelo y pudo haber limitado la correspondencia entre las mediciones de campo y los parámetros de suelo ingresados al modelo en cada sitio (debido a la implementación de métodos destructivos de estimación de biomasa aérea e índice de área foliar, que llevaba a medir en otro lugar diferente).

Si obtuvieron un buen ajuste en la dinámica de agua en el suelo, sin indicios claros respecto a la razón por la cual a pesar de no existir adecuados ajustes en biomasa, que en definitiva es la que determina el consumo de agua, ésta logre un buen ajuste. Para este problema plantean dos alternativas, una

es que el modelo sobreestime otros procesos involucrados en la dinámica del agua en el suelo, como drenaje profundo y evaporación. La otra es que a la profundidad de muestreo el consumo este bien simulado y el crecimiento radical supere esa profundidad, y por tanto el mayor crecimiento de biomasa este dado por el consumo de agua en profundidad.

En el mismo trabajo, un grupo de suelos calcáreos utilizados en la validación logró el peor ajuste, pero sirvió para formular una hipótesis muy interesante, con implicancias directas en el ajuste de CropSyst en este tipo de suelos. Con perfiles de 30-35 cm logró alta producción de biomasa aérea ($10.400 \text{ Kg.MS.ha}^{-1}$) y un rendimiento en grano que superó los 4.000 Kg.ha^{-1} . Para lograr esta producción de biomasa, basándose en la ecuación de Sinclair (1998), los autores estiman que el cultivo tuvo que transpirar 416mm de agua. Realizaron luego un balance hídrico, y notaron que al cultivo le quedarían disponibles para transpirar 174 mm. De acuerdo a resultados de la simulación de CropSyst, sería necesaria una profundidad de 75 cm del horizonte más profundo, o sea una profundidad total del perfil de 120 cm, para alcanzar en la estimación del modelo niveles de acumulación de biomasa semejantes a los observados a campo. Entonces para que realmente exista esa producción de biomasa el cultivo debe tomar agua de otra parte, por lo que plantean la hipótesis de que las raíces penetren horizontes calcáreos en profundidad.

2.2.2 Antecedentes en girasol

El trabajo de Donatelli et al. (1997), incluyó girasol en una de las rotaciones empleadas en Foggia. Los resultados que obtuvieron para la simulación del rendimiento en diferentes años fue satisfactoria, los resultados del modelo mostraron cierta dispersión, pero la variabilidad en el intervalo de 2 a aproximadamente 4 t/ha fue razonablemente explicada, (r^2 0,63).

Otro trabajo realizado en Foggia, Ventrella y Rinaldi (1999), compararon la respuesta al rendimiento en grano y la dinámica del agua en el suelo entre CropSyst y el modelo EPIC. Para esto conformaron tres sistemas de cultivo: trigo duro continuo y dos rotaciones anuales, trigo duro-girasol, y trigo duro-sorgo, en un experimento de largo plazo (8 años), a dos niveles de entrada de tecnologías de producción, y así determinar si los modelos podrían tener en cuenta el año, la rotación, y los efectos de nivel de entrada de tecnologías. Estos experimentos se instalaron sobre Vertisoles de origen aluvial (de acuerdo a la taxonomía de suelos-USDA).

En el caso de los rendimientos, los resultados que obtuvieron fueron satisfactorios, con valores de la relación de la RCME de la simulación de 25 y

11% para CropSyst, y de 18 y 28% de EPIC, valores de girasol y sorgo, respectivamente.

El contenido de agua del suelo se estimó correctamente, especialmente en la parte central del ciclo del cultivo, con valores del coeficiente de regresión "b" de CropSyst: 0,63 sorgo y 0,68 girasol para ese momento, pero fue sobreestimado hacia el final del ciclo. Teniendo en cuenta todo el ciclo del cultivo, para girasol, la relación de la RCME de CropSyst resultó en 15,19%.

La dificultad relativa a la simulación del contenido de agua de ambos modelos, se debió a que ninguno de ellos tuvo en cuenta el proceso de formación y desarrollo de las grietas, por complejos fenómenos de contracción y expansión del vertisol, que permiten una mayor pérdida de agua por evaporación y la formación de los flujos de agua preferenciales en el perfil del suelo lo que produce una sobreestimación sistemática durante las últimas fases de los ciclos de cultivo, especialmente cuando el contenido de agua se acercó y a veces descendió por debajo del punto de marchitez permanente.

Pocas experiencias de modelos de simulación están disponibles en relación con el contenido de agua del suelo. Ceotto et al. (1994), en el norte de Italia usando CropSyst, y Rinaldi y Ventrella (1997), en el sur de Italia usando los modelos EPIC y CropSyst, verificaron en general, un buen ajuste en la simulación de la humedad del suelo, pero en particular, una escasa capacidad para simular los valores por encima de la capacidad de campo y por debajo del punto de marchitez permanente.

Haciendo referencia a este problema, los autores proponen otros estudios y las posibles modificaciones de la fuente del programa, que parecerían ser necesarios para mejorar la simulación de procesos complejos en relación con el sistema suelo-planta, por ejemplo, los complejos fenómenos de contracción y expansión del vertisol, y el efecto del estrés hídrico en el índice de cosecha valor que, en el caso de secuencias repetidas de los cultivos, podría causar errores sistemáticos o una autocorrelación en el el largo plazo.

En cuanto a los tratamientos experimentales, cabe resaltar la pobre sensibilidad de los dos modelos en la simulación del efecto anterior de girasol y el cultivo de sorgo en el rendimiento de grano de trigo duro, en comparación con el cultivo continuo que solo CropSyst dio resultados aceptables. Cady (1991), en experimentos de campo a largo plazo, manifiesta que efectos acumulados en el tiempo (directo + efecto residual) de diferentes

tipos (modificación del contenido de agua del suelo, nutrientes, malezas, plagas) están presentes, y que interactuando con las variables del clima, podrían influir positiva o negativamente en el rendimiento del cultivo. Esto implica una comprensión compleja de todos los procesos que interactúan en un suelo sometido a secuencias repetidas de los cultivos.

Otro trabajo, simulando el crecimiento de girasol bajo diferentes regímenes hídricos, fue llevado a cabo por Todorovic et al. (2009), en una zona típicamente mediterránea del sur de Italia. Con el fin de evaluar el desempeño de AquaCrop, con otros dos modelos de simulación, CropSyst y WOFOST, realizaron trabajos de campo en 2005 y 2007. Con los datos experimentales de un híbrido bajo riego obtenidos en 2007 calibraron los modelos, y con datos experimentales de diferentes regímenes hídricos de 2005 realizaron la validación de los mismos.

Con los parámetros obtenidos en la calibración los tres modelos simularon casi a la perfección la biomasa final obtenida en el campo, aunque CropSyst mostró una ligera subestimación del 2,9%. El rendimiento simulado también fue muy satisfactorio, en consecuencia, el IC (índice de cosecha) se simuló de manera adecuada por todos los modelos. Antes de floración CropSyst sobreestimó el desarrollo del IAF en comparación con los datos medidos. En la floración, sobreestimó el IAF máximo alrededor de 6%, y durante la senescencia, siguió la tendencia medida del IAF.

En la etapa de validación de los modelos bajo diferentes tratamientos, se obtuvo:

- Simulaciones de WOFOST superiores con respecto a los otros dos modelos en condiciones de secano y en el riego deficitario controlado. Tanto AquaCrop como CropSyst tuvieron un buen desempeño en riego completo, y en ligero a moderado estrés hídrico que se produjo en algunos tratamientos. La razón de esto no es otra que el menor número de parámetros de entrada y las simplificaciones introducidas en estos modelos, las que hacen al mismo tiempo que estos sean más fáciles de calibrar y realizar estudios de simulación.

- En la mayoría de los escenarios el rendimiento fue simulado con un error razonable, +/- 0,5 Mg ha⁻¹. Encontraron una tendencia general de todos los modelos a la subestimación de los rendimientos bajo condiciones severas de estrés hídrico.

Estos autores concluyen que simplificaciones adoptadas en AquaCrop y en CropSyst podrían ser un factor limitante de ambos modelos en situaciones de necesidad de simulación bajo estrés hídrico severo, esto se debe a la falta

de un submodelo fisiológico de plantas más complejo para tener en cuenta el impacto del estrés hídrico sobre el crecimiento de biomasa y su partición en el rendimiento.

Carmona et al. (2007), con el objetivo de analizar los sistemas de cultivo existentes en la cuenca del Aveyron-Lère, situada en el departamento de Tarn et Garonne, en la región de Midi-Pyrénées (Francia), buscaron establecer los efectos que los distintos modos de gestión del riego y la fertilización nitrogenada tienen sobre el medioambiente y sobre los márgenes obtenidos a nivel de explotación y a nivel regional. Calibraron CropSyst para diferentes cultivos de la región, entre ellos girasol, y así construir un marco de negociación sobre la elección de las técnicas relacionadas con el consumo de agua y la utilización de nitrógeno, siendo necesario evaluar el impacto de las alternativas posibles y buscar soluciones negociables. Esas alternativas posibles se establecieron con la ayuda de modelos bioeconómicos que representan el funcionamiento de las explotaciones y de los cultivos.

La zona presenta un relieve variado y tres tipos de suelos. En la validación del modelo se estableció una correlación entre los rendimientos simulados y los rendimientos observados tanto para, un año seco, un año de tipo medio, y un año húmedo, buena, con coeficientes de correlación superiores a 75%. La validación del modelo consistió en la comparación entre rendimientos observados y simulados para todos los tipos de suelo y un año medio. Los resultados mostraron que las diferencias fueron menores en los cultivos irrigados (< 1%). En el caso de cultivos de girasol en secano las diferencias entre lo observado y simulado fueron mayores, y a su vez las diferencias se acrecentaron desde los suelos con mayor capacidad de retención de agua, de 12 a 22,9%, en la medida que disminuía la capacidad de retención de los mismos.

Finalmente, en la región de Toscana al centro de Italia, Dalla Marta et al. (2010), buscaron evaluar el impacto del cambio climático sobre la productividad de dos cultivos y cuantificar la variabilidad del potencial de producción debido al cambio climático. El efecto del cambio climático y la variabilidad se analizó mediante el potencial de producción de bioenergía en términos de aceite vegetal puro (girasol) y el bioetanol (maíz). Para esto CropSyst fue calibrado y validado con datos de un sitio experimental ubicado en Montepulciano (Siena). Datos de rendimiento estaban disponibles desde 1995 hasta 2004 para el maíz y de 1995 a 2003 para el girasol. Los análisis estadísticos de la validación del modelo para el rendimiento de girasol en el período 1998-2004, mostraron resultados muy satisfactorios RCME 231,44 Kg⁻¹, y un coeficiente de correlación de 0,83.

2.3 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

En soja, dos trabajos obtuvieron ajustes satisfactorios del rendimiento, dos no lograron un buen desempeño del modelo para esta variable, y otro obtuvo resultados positivos y negativos. Los casos en que no se logró un buen ajuste, se componen por dos experiencias usando rotaciones largas (tres con la experiencia de Ceotto et al. (1993), la cual no consideramos por trabajar con un modelo diferente al nuestro, una de ellas, Donatelli et al. (1997), obtuvo buenos resultados al norte del país de origen, y no así al sur, caracterizado por suelos mas limitantes desde el punto de vista hídrico y con fenómenos naturales que harían variar el contenido de agua de los mismos que el modelo no considera, no pudiendo comprobar las razones de sus resultados por el diseño de sus ensayos. La experiencia local, que no incluyó rotaciones, y con resultados desfavorables en la validación, no logró identificar problemas propios del modelo, pero si problemas metodológicos del trabajo que impedirían, a priori, el buen ajuste de CropSyst.

La simulación del rendimiento de girasol no presentó resultados desfavorables, las cinco experiencias citadas estuvieron dentro de errores aceptables. Escenarios como cultivos regados, ausencia de estrés hídrico severo, o suelos con mayor capacidad de almacenaje de agua, obtuvieron mejores resultados que suelos con menor capacidad de almacenaje, condiciones de secano, o déficit hídrico ligero a severo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO

El experimento se llevó a cabo en dos años consecutivos. Para esto se sembraron cultivos en parcelas experimentales sobre las cuales se realizaron diferentes tipos de mediciones necesarias para la calibración y validación del modelo en cuanto a crecimiento y desarrollo. Los ensayos se sembraron durante el verano 2009-2010 (primer año), y 2010-2011 (segundo año). Los datos generados en el primer año fueron utilizados para la calibración de CropSyst, mientras que los del segundo año para su validación.

3.1.1 Localización y descripción de suelos

Los experimentos se instalaron en la Estación Experimental “Dr. Mario A. Cassinoni” (32° 22' S 58° 03' W), de la Facultad de Agronomía (UdelaR). Ubicada en el Km. 363,500 de la Ruta Nacional No. 3, departamento de Paysandú, República Oriental del Uruguay.

Los suelos del sitio experimental se corresponden con Brunosoles éutricos y subeútricos, sobre formación geológica Fray Bentos. Unidad de suelos San Manuel, según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000 (URUGUAY. MAP, 1976). Los mismos pertenecen al grupo 11.3 (CONEAT), presentando en términos generales: fertilidad alta, textura franco arcillo limosa y drenaje moderado a imperfecto.

3.1.2 Diseño experimental

En ambos años no existió un diseño experimental en particular. Las unidades experimentales estuvieron compuestas por parcelas sembradas con los cultivos y cultivares (6 x 10 m). Para cada parcela se evaluaron las características edáficas y nutricionales al inicio de cada cultivo. Cada cultivo fue sembrado en cada año en tres épocas de siembra y dos cultivares de cada especie por época.

De esta forma se contó con una base de datos “heterogénea” para calibrar y validar el modelo. La asignación de cada especie en las parcelas no fue aleatoria, se les asignó un orden y al siguiente año se rotó con girasol donde hubo maíz y soja donde previamente hubo sorgo, ya que los ensayos contenían también estos dos cultivos los cuáles serán analizados en otro trabajo de tesis.

3.1.3 Instalación, manejo, y cultivares

El primer año de ensayos contó solo con dos épocas de siembra, intermedia para soja, e intermedia y tardía para girasol, el 08/12/2009 y el 8/01/2010, intermedia y tardía, respectivamente, ya que se perdió la época temprana en ambos cultivos y la tardía en soja. Mientras que el siguiente año el 18, 21, y 25/10/2010 se sembró la época temprana; el 10/11/2010 la época intermedia; y el 13/12/2010 la época tardía, tanto en soja como en girasol.

La siembra fue realizada con una sembradora directa Semeato SHM-11, a una distancia entre hileras de 0.52 m. Los cultivos fueron manejados de forma de no limitar el crecimiento, la fertilización fue manejada de acuerdo a la información de modelos con niveles críticos para la zona, y se procuró mantener los cultivos libres de plagas, malezas y enfermedades durante todo su ciclo.

A continuación se presentan los cultivares de soja y girasol utilizados en este trabajo, respectivamente:

- DON MARIO 5.1 i: Perteneciente al criadero DON MARIO S.A. Según evaluación nacional de cultivares de soja zafra 2008/09: Grupo de madurez 5.1; ciclo a floración promedio para 2 ensayos, 36 días; rendimiento promedio para 4 ensayos, en 2 zonas y años diferentes, 3650 Kg. /há, mientras que la media general de todos los cultivares evaluados fue de 3714 Kg. /há.

- A 6411 RG: Perteneciente al criadero NIDERA S.A. Según evaluación nacional de cultivares de soja zafra 2004/05: Grupo de madurez 6.4; ciclo a floración promedio para 2 ensayos en zonas diferentes, 59 días; análisis conjunto para rendimiento de grano en los 5 ensayos de 2003 y 2004, 2820 Kg. /há., 115% respecto a la media de los ensayos.

- MG 52: Híbrido simple perteneciente al criadero DOW AGROSCIENCES. Según la evaluación nacional de cultivares de girasol del periodo 2009: Días a floración promedio, 65 días; escala de vuelco del capítulo, 4 (tallo curvado entre 16-35 %); rendimiento en grano 1656 Kg. /há, 87% respecto a la media; rendimiento de aceite, 665 Kg. / há., 88% respecto a la media.

- DEKASOL 3940: Híbrido simple perteneciente al criadero MONSANTO. Según la evaluación nacional de cultivares de girasol del periodo 2009: Días a floración promedio, 64 días; escala de vuelco del capítulo, 3 (tallo curvado hasta en un 15%); rendimiento en grano 2211 Kg. /há, 116% respecto a la media; rendimiento de aceite, 879 Kg. / há., 117% respecto a la media.

3.2 RELEVAMIENTO DE DATOS

3.2.1 Inherentes al suelo

3.2.1.1 Textura, materia orgánica, y densidad aparente

Estos datos fueron necesarios tanto como “inputs” requeridos por el programa, como también asociados al cálculo de otros datos de interés. Previo a la siembra se extrajeron muestras de suelo hasta el material madre, éstas fueron en un rango variable de profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-70, y 70 a más cm.) y con ellas se determinó la textura, el porcentaje de materia orgánica (MO%), y la densidad aparente (DA) de los suelos. La textura se determinó por el método de Bouyoucos (1936), la materia orgánica por el método de Walkey y Black (1934), y la densidad aparente se calculó utilizando submuestras que fueron secadas previamente a estufa a una temperatura de 105 °C hasta masa constante.

Con la información de textura y materia orgánica se estimó el agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente utilizando la ecuación de (Saxton y Rawls, 2006).

3.2.1.2 Humedad

Para cada unidad experimental se recabó el dato de humedad del suelo para diferentes estados fenológicos de los cultivos (siembra, V6, R1 y cosecha). El procedimiento consistió en estimar la humedad gravimétrica del suelo, que es la relación entre la masa de la fracción líquida y la masa de la fracción sólida de una muestra de suelo para cada momento de muestreo:

$$Hg = (M_T - M_S) / M_S$$

Dónde:

Hg: ($g\ g^{-1}$): Humedad gravimétrica.

M_T (**g**): Masa total de la muestra, suelo y agua.

M_S (**g**): Masa de suelo seco de la muestra. Que se obtuvo secando la muestra en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante.

Obtenido el valor de humedad gravimétrica, se calculó la humedad volumétrica, que es la relación entre el volumen de la fracción líquida y el volumen de la muestra:

$$H_v = H_g * DA$$

Dónde:

H_v (m³ m⁻³): Humedad volumétrica.

H_g (g g⁻¹): Humedad gravimétrica.

DA (g cm⁻³): Densidad aparente del suelo.

Finalmente al contenido de agua del suelo en cada momento se expresó como lámina de agua, que es el producto de la profundidad de cada estrato del perfil por la humedad volumétrica en cada estrato. Sumados todos ellos se obtienen los milímetros de agua en todo el perfil para cada momento.

3.2.1.3 Nitrógeno

En este caso, se muestreó el suelo de la misma forma que humedad, en las mismas fechas. Se procesaron las muestras secándolas en estufa a 60 °C durante 48 horas, y luego molidas. Posteriormente en el laboratorio de Facultad de Agronomía (EEMAC, Paysandú), mediante la técnica de electrodos de nitratos, utilizando un equipo Orion (modelo 93-07) y CaSO₄ como floculante, se estimaron las partes por millón de N-NO₃- para cada muestra.

3.2.2 Inherentes al cultivo

3.2.2.1 Fenología, biomasa aérea, índice de área foliar, y acumulación de nitrógeno

Durante el ciclo de los cultivos, cada 10-15 días se realizaron lecturas de fenología. Para el caso de soja, la escala utilizada fue la elaborada por Fehr y Caviness (1977), y para girasol la escala elaborada por Villalobos et al. (1996).

Para determinar biomasa se realizaron cortes de 2 m lineales de plantas al ras del suelo a V6, R1 y cosecha. Se pesaron las muestras, luego se secaron submuestras para determinar el contenido de materia seca, y con estos datos se calculó la biomasa acumulada en cada momento. Estas mismas muestras fueron molidas y utilizadas para estimar la concentración de nitrógeno por el método Kjeldahl. La acumulación de nitrógeno se obtenía finalmente

multiplicando la concentración del nutriente por los kilos de biomasa en cada momento.

Por último, en los mismos momentos que se hicieron las estimaciones de biomasa, y previo a los cortes, en la misma zona se determinó la interceptación de radiación y el índice de área foliar (IAF) con el dispositivo LAI 2000.

3.2.2.2 Rendimiento en grano

Se cosecharon 2 líneas de plantas de un metro de largo en cada sitio. Las muestras se colocaron en estufa a 60°C durante 24 horas, y se trillaron de forma manual. La humedad del grano a la trilla fue variable, pero el rendimiento se corrigió finalmente a 0% de humedad.

3.2.3 Inherentes al clima

Datos de temperatura máxima y mínima, precipitaciones, radiación solar, humedad relativa máxima y mínima para el período de análisis, fueron obtenidos de una estación meteorológica situada en las cercanías del ensayo. Los datos fueron ingresados al modelo a través de la interfase denominada "ClimGen" por medio de la cual se transformaron datos de formato Excel a formato UED (Universal Environmental Database).

3.3 CALIBRACION DE CROPSYST

La versión de CropSyst utilizada fue la 4.13.04, de libre acceso, disponible en la página Web de la Washington State University.

La obtención de los parámetros genéticos para cada cultivar, necesarios en la correcta modelación por CropSyst, se pueden obtener de cuatro fuentes distintas: a) mediciones obtenidas en los ensayos de campo; b) valores citados de la bibliografía disponible; c) por "default" (valor propuesto por el modelo); y d) tomando el valor obtenido de la calibración, producto de correr el modelo hasta que el resultado de la predicción coincida con los valores obtenidos en los ensayos de campo, y corroborando que estos valores estén dentro de valores posibles citados en la bibliografía.

3.3.2 Metodología

En una primera instancia se utilizó la interfase del modelo denominada “Crop Calibrator” para ajustar parámetros hasta lograr que el modelo se comporte de acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente. En una segunda instancia, se hizo un ajuste manual corriendo el modelo hasta obtener un buen ajuste con los resultados experimentales.

Se diseñaron tablas en Excel que permitían rápidamente contrastar datos observados y simulados de cada unidad experimental, con el objetivo de conocer e ir logrando en esta instancia, un adecuado ajuste entre las diferentes variables a medida que se iban modificando diferentes parámetros del software. Las variables calibradas fueron el rendimiento en grano, la producción de biomasa, el índice de área foliar, la acumulación de nitrógeno en planta, y el contenido de agua en el suelo.

3.3.3 Análisis de resultados

Mediante dos herramientas se evaluó el ajuste del modelo, el gráfico de línea 1:1 y el cálculo de la relación de la raíz del cuadrado medio del error, RMCE (%). El primero consiste en un método de apreciación visual, mientras que el segundo evalúa la relación entre la raíz del cuadrado medio del error con la media observada para cada variable.

A través de las siguientes ecuaciones se obtiene el valor de la RCME (%):

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_j)^2}{n}}$$

Donde:

S_i: Valores simulados.

O_j: Valores observados.

n: Número de medidas, sitios de muestreo.

$$\frac{RCME}{MediaObservada} \times 100 = RCME(\%)$$

3.4 VALIDACIÓN DE CROPSYST

Esta etapa busca la confirmación de que el modelo logra un buen desempeño en una situación diferente a la que se usó para la calibración. El procedimiento consistió en la comparación de los valores simulados por el modelo con las medidas recabadas en el primer año de siembra 2009-2010, manteniendo el valor de los coeficientes del cultivo obtenidos en la calibración, pero trabajando con un set de datos independientes de los utilizados para la misma. Asociados estos datos a una condición de parcela diferente en cuanto al cultivo antecesor, la humedad a la siembra, variaciones en las propiedades hidráulicas del suelo de cada parcela por el ordenamiento diferencial de los cultivos, y las diferencias climáticas entre ambos años. La validación de soja también incluye la evaluación del ajuste de los resultados obtenidos por CropSyst con los obtenidos en otra zona de la misma estación experimental, en la cual, con otros fines, se sembró soja durante tres años consecutivos, se presenta en una sección del siguiente capítulo como: "Validación potrero 27".

Las variables del cultivo analizadas en esta etapa son las mismas que para la calibración: rendimiento en grano, acumulación de biomasa, índice de área foliar, acumulación de nitrógeno en planta, y contenido de agua en el suelo. La validación de soja en el potrero 27 incluye el rendimiento en grano, la biomasa a cosecha, y el índice de cosecha.

La metodología de evaluación del ajuste de estas variables fue la misma que la utilizada en la instancia anterior, el gráfico de línea 1:1 y el cálculo de la relación de la raíz del cuadrado medio del error RCME (%).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL PERÍODO EXPERIMENTAL

A continuación se presenta información que incluye las variables de mayor importancia para el crecimiento y desarrollo de los cultivos: precipitación, temperatura, y radiación solar para ambos períodos de experimentación, en relación a una serie histórica de 7 años (2002-2008), de una estación meteorológica situada en las cercanías del ensayo, de forma de poder discutir y analizar los resultados obtenidos en los experimentos de campo.

4.1.1 Precipitación y temperatura

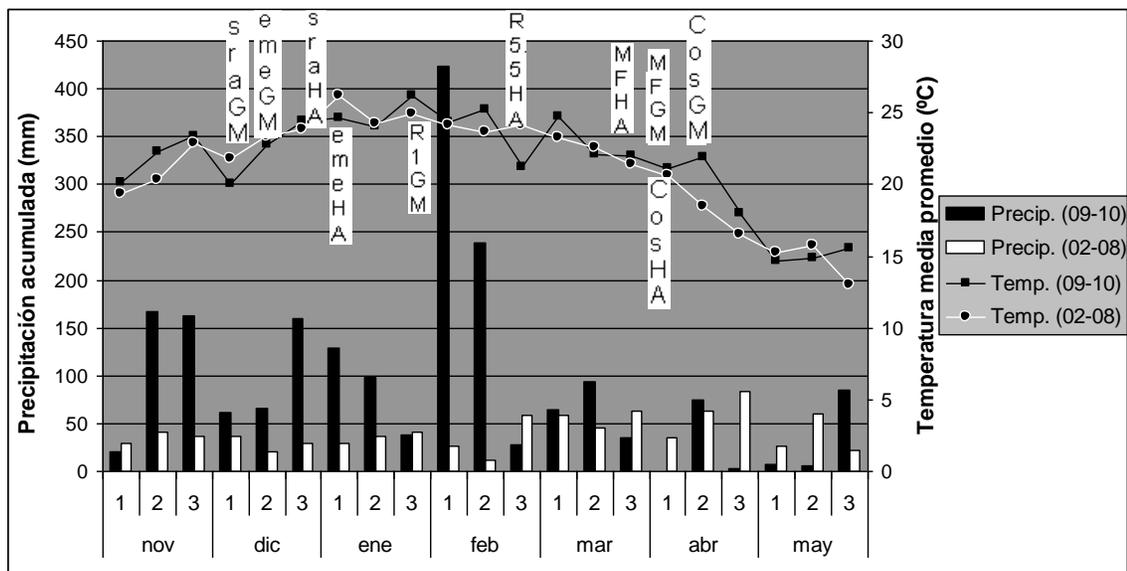


Figura No. 1: Precipitación acumulada y temperatura promedio del período experimental 2009-2010 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.

Recuadros blancos en el gráfico indican los estadios fenológicos de los cultivos. En soja es promedio de los dos cultivares sembrados, al contar solo con la época intermedia de siembra, y girasol es un promedio entre la época intermedia y la tardía, y los dos cultivares utilizados, (sra= siembra; eme= emergencia; R1= inicio floración soja; R5.5= 50% del capitulo en anthesis girasol; MF= madurez fisiológica; Cos= cosecha; GM= Glycine Max; HA= Helianthus Annuus).

Durante el período experimental 2009-2010 llovieron 1964 mm, esto es el 230% del promedio del mismo período en los años que tomamos como referencia (855 mm). El gráfico muestra que la mayor diferencia entre el año de siembra de los ensayos y la serie histórica se da básicamente en los primeros 4 meses del período, y solo en los primeros 20 días del mes de febrero, del año de experimentación, se registraron el 34% del total de las precipitaciones de los 210 días que comprenden el período.

La temperatura promedio no muestra diferencias de incidencia significativa en la producción de los cultivos en ambos registros. En las partes de medular importancia del crecimiento, según los promedios de fenología de cada cultivo, la temperatura promedio de cada década estuvo cercana a los óptimos de cada especie, más favorable a girasol (23° c), que a soja (25-30° c). Sin extremos en esta variable como para afectar por períodos prolongados el crecimiento de los cultivos (soja: 6-9°c, 40°c; girasol: 4°c, 40°c; temperatura base y máxima, respectivamente).

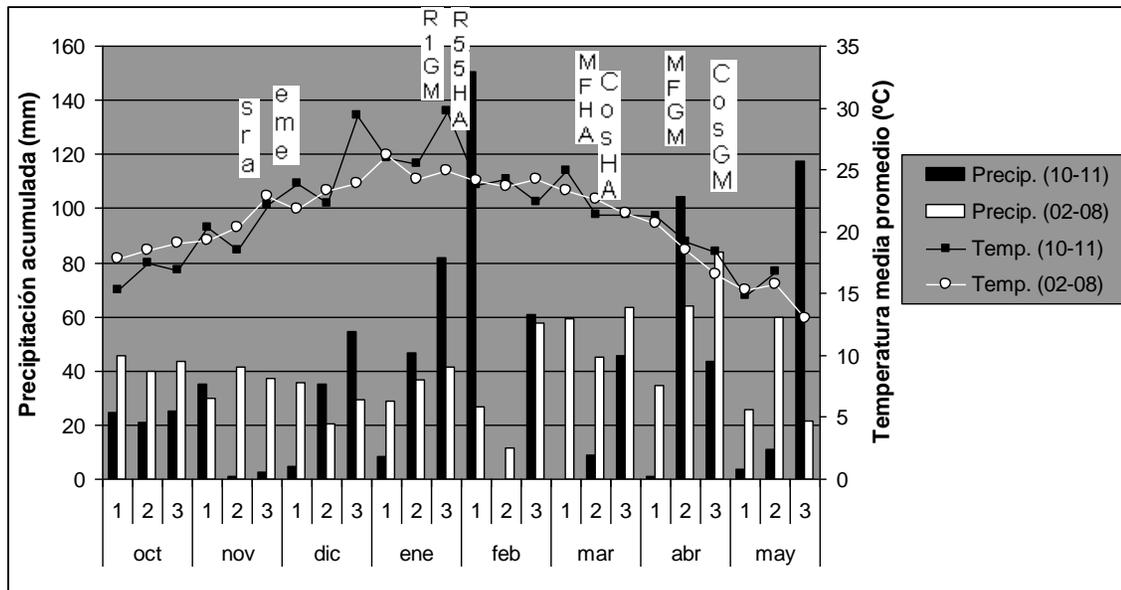


Figura No.2: Precipitación acumulada y temperatura promedio del período experimental 2010-2011 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.

Recuadros blancos indican estados fenológicos de los cultivos. Para ambas especies son promedios de tres épocas de siembra diferente y dos cultivares, (sra= siembra de ambas especies; eme= emergencia de ambas especies; R1= inicio floración soja; R5.5= 50% del capítulo en antesis girasol; MF= madurez fisiológica; Cos= cosecha; GM= Glycine Max; HA= Helianthus Annuus).

En este caso las precipitaciones acumuladas en el período 2010-2011 fueron un 10% menor que el promedio de la serie, (887 vs. 984 mm.). En el año de experimentación existieron varias décadas en las cuales llovieron 10 o menos milímetros (10 décadas), levantándose esta restricción en no más de 3 décadas seguidas (un solo caso, entre noviembre y diciembre no llovió por 30 días, la segunda década de diciembre llovieron cerca de 40 milímetros). Y desde aquí, segunda década de diciembre, hasta marzo, en torno a los periodos críticos del conjunto de los cultivos, se dieron precipitaciones de mayor cuantía, considerando que en este período los cultivos requieren el mayor porcentaje del agua total, y la evapotranspiración de estos meses es mayor en comparación a otros de la serie.

4.1.2 Radiación solar

En el período 2009-2010 la radiación solar incidente fue menor, producto de la mayor cantidad de precipitaciones ocurridas y nubosidad asociada. Igualmente la misma fue igual a la registrada en la serie histórica.

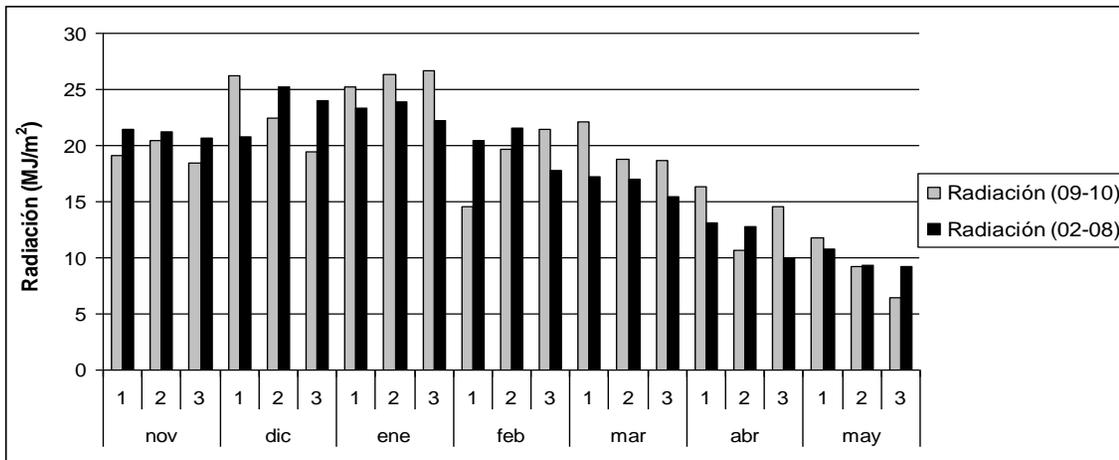


Figura No. 3: Radiación solar del período experimental 2009-2010 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.

La mayor diferencia en la radiación solar incidente acumulada se dio en el segundo periodo de experimentación (2010-2011), donde la misma fue 16% superior a la media de la serie (497 vs. 429 MJ/m², respectivamente) lo que es coincidente con los mayores periodos de ausencia de lluvias.

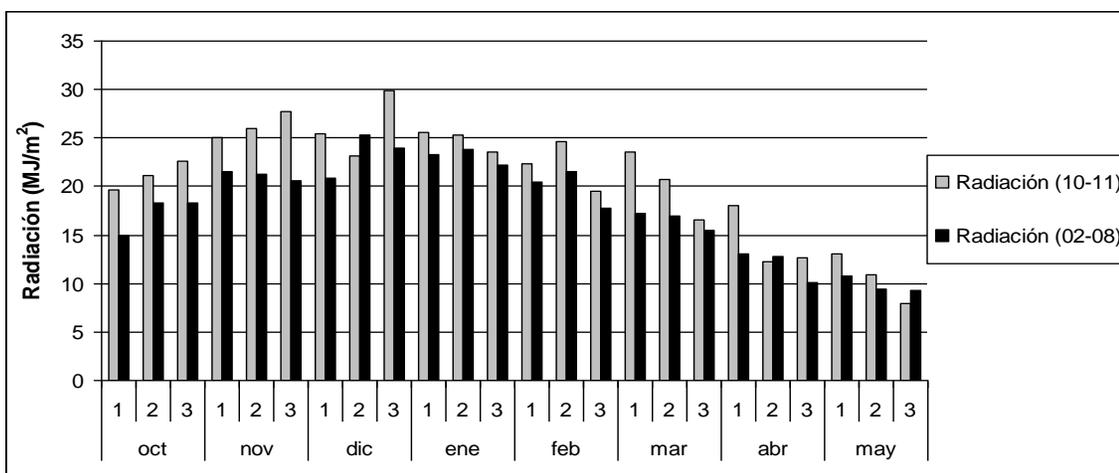


Figura No. 4: Radiación solar del período experimental 2010-2011 en relación a la serie 2002-2008. Promedio decádico.

4.2 VARIABILIDAD DE LAS PARCELAS EXPERIMENTALES

Los puntos de muestreo dentro de las parcelas se definieron por la toposecuencia de las mismas, donde se diferenciaron tres zonas: una baja, una media, y una correspondiente a la zona más alta de la pendiente que corría de forma longitudinal a las parcelas. El valor promedio de textura, materia orgánica y capacidad de almacenaje de agua de cada una de estas zonas para el conjunto de las parcelas se presenta a continuación.

Cuadro No. 1: Textura, materia orgánica, y capacidad de almacenaje de agua de las tres zonas topográficas dentro de las parcelas experimentales.

Zona	Profundidad	Limo	Arcilla	Arena	%MO	CC (mm)
BAJA	0-10	53,53	27,70	18,78	2,60	14,24
	10-20	49,50	28,50	22,00	2,09	29,37
	20-30	49,50	24,50	26,00	1,83	26,96
	30-50	47,50	28,50	24,00	1,18	58,36
	50-70	38,00	45,00	17,00	0,78	78,97
MEDIA	0-10	46,97	30,12	22,90	2,26	15,24
	10-20	43,80	32,70	23,50	1,85	32,23
	20-30	35,50	45,50	19,00	1,26	39,98
	30-50	33,00	51,50	15,50	1,02	86,61
	50-70	42,25	41,50	16,25	0,58	74,15
ALTA	0-10	47,25	30,20	22,50	2,26	15,25
	10-20	45,10	29,40	25,50	1,87	30,25
	20-30	39,00	40,50	20,50	1,52	36,95
	30-50	34,00	49,50	16,50	0,97	84,17
	50-70	39,30	44,50	16,20	0,75	78,13

Según el triángulo de texturas de suelo del USDA, la misma está en torno a suelos franco-arcillosos (zona baja), y franco arcillo-limosos (zona media y alta). No se aprecian grandes diferencias en el porcentaje de materia orgánica, no esperando diferencias significativas en la productividad de estos suelos según estos datos.

En lo referente a la capacidad de almacenaje de agua, en el cuadro vemos que es mayor la capacidad de retención de las zonas media y alta en relación a la zona baja, sin embargo esto no es así, ya que el promedio de las distintas zonas a capacidad de campo es de: 330, 326, 309 mm., baja, media, y alta, respectivamente. La diferencia radica en la profundidad de los perfiles, aquí a modo de comparativo el límite se estableció en 70 cm., pero en promedio

sus profundidades son de: 98, 87, y 82 cm., baja, media, y alta, respectivamente.

4.3 RESULTADOS DE ENSAYOS DE CAMPO

Las medidas recabadas en ambos cultivares de cada especie, en sus diferentes años, épocas de siembra, y puntos de muestreo, se agruparon; de forma de presentar y discutir particularidades de la variabilidad general de los resultados en las variables objeto de estudio.

4.3.1 Rendimiento, biomasa a cosecha, e índice de cosecha

4.3.1.1 Soja

En la zafra 2010-2011, a medida que la época de siembra se atrasó, los rendimientos fueron mejorando en ambos cultivares. Asociado esto a la mejoría en las precipitaciones que se registraron a partir de la segunda década del mes de diciembre, lo que les permitió a las épocas más tardías “escapar” de las menores precipitaciones registradas en los primeros meses del período.

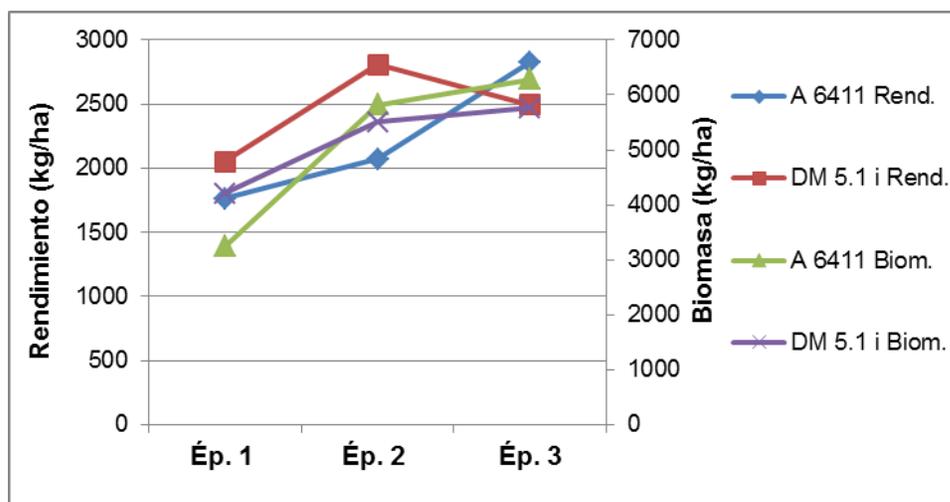


Figura No. 5: Rendimiento en grano y biomasa a cosecha según época de siembra en soja. Promedio de puntos de muestreo de cada época y cultivar. Período 2010-2011.

Sólo se incluyeron en la figura anterior datos del segundo año de ensayos, ya que como se mencionó, en soja se perdieron dos épocas de siembra, y solo de un cultivar se obtuvieron datos de biomasa a cosecha en el período 2009-2010. Igualmente la totalidad de resultados y su variación se analizan a continuación.

Cuadro No. 2: Rendimiento en grano, biomasa a cosecha e, índice de cosecha para ambos cultivares de soja en los dos períodos de ensayo. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.

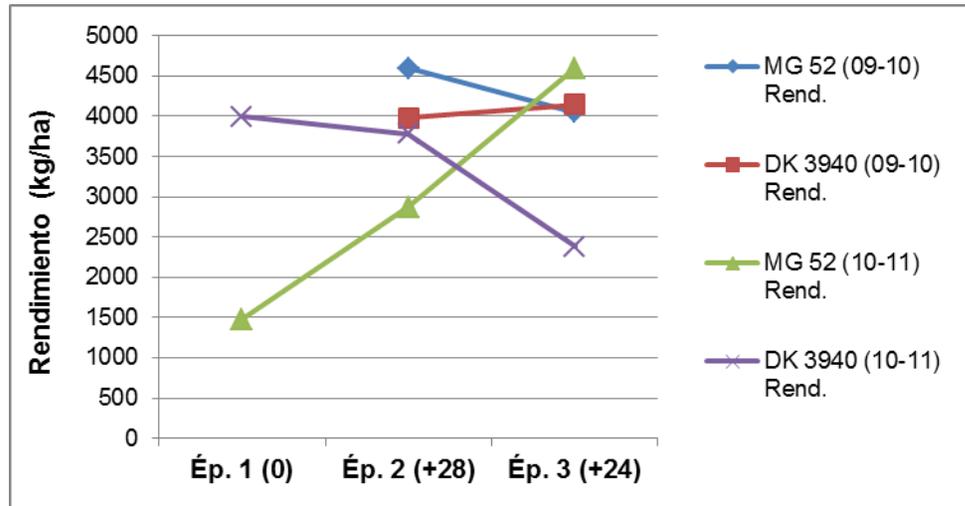
A 6411	Zafra	Máximo	Mínimo	Media	CV%
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	09-10	4774	4143	4402	7,50
	10-11	3445	1416	2220	28,41
Biomasa cosecha (kg ha ⁻¹)	09-10	---	---	---	---
	10-11	6906	3064	5115	28,83
Índice de cosecha	09-10	---	---	---	---
	10-11	0,62	0,32	0,45	21,75

DM 5.1 i	Zafra	Máximo	Mínimo	Media	CV%
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	09-10	4863	4054	4471	9,06
	10-11	3588	1776	2452	22,91
Biomasa cosecha (kg ha ⁻¹)	09-10	12002	9514	10351	13,81
	10-11	6361	4023	5158	16,43
Índice de cosecha	09-10	0,51	0,37	0,44	8,50
	10-11	0,57	0,39	0,47	11,78

Los rendimientos del primer año, tanto en un cultivar como en otro, fueron superiores a sus pares de la misma época de siembra del año siguiente, pudiendo constatar esto en la Figura No. 5. También se aprecia la menor variación que hubo entre ellos en relación al año siguiente, debido a que este último incluyó dos épocas más de siembra. Las diferencias cercanas al 100% en la media de los rendimientos en ambos cultivares (98 y 82%, A 6411 y DM 5.1 i, respectivamente), y de la biomasa a cosecha de uno de ellos, para el primer año de siembra, estarían asociados a la mejor condición hídrica a la que estuvieron sometidos los cultivos ese primer año, con una diferencia entre precipitaciones acumuladas del 221% entre años, como fue detallado en la sección anterior.

4.3.1.2 Girasol

En este gráfico se presentan los resultados de rendimiento de ambas zafras. La particularidad en el segundo año de siembra la constituye el cultivar DK 3940, que se comportó de forma contraria a los cultivares de soja del mismo año, y al cultivar MG 52 de su misma especie, los cuáles mejoran sus rendimientos a medida que nos ubicamos en fechas de siembra más tardías. Esto posiblemente estuvo asociado a problemas de enfermedades y pájaros, consecuencia del menor largo del ciclo de este cultivar.



Figurã No. 6: Rendimiento en grano según época de siembra en girasol. Promedio de puntos de muestreo de cada época y cultivar. Períodos 2009-2010 y 2010-2011.

Al no ser coincidentes las épocas entre años, las fechas del primer año se expresan entre paréntesis como la diferencia en días de las del período 2010-2011.

Cuadro No. 3: Rendimiento en grano, biomasa a cosecha e, índice de cosecha para ambos cultivares de girasol en los dos períodos de ensayo. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.

MG 52	Zafra	Máximo	Mínimo	Media	CV%
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	09-10	4786	3664	4322	11,94
	10-11	5224	1478	2983	49,35
Biomasa cosecha (kg ha ⁻¹)	09-10	14903	12799	14171	8,39
	10-11	16198	4922	10204	38,79
Índice de cosecha	09-10	0,36	0,30	0,33	10,47
	10-11	0,52	0,18	0,35	36,13

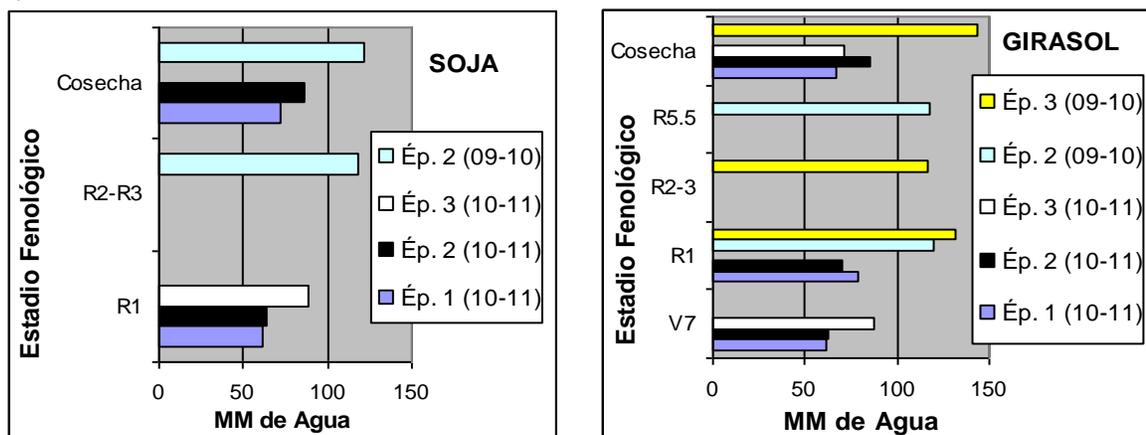
DK 3940	Zafra	Máximo	Mínimo	Media	CV%
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	09-10	4859	3097	4059	16,97
	10-11	4614	1629	3339	28,07
Biomasa cosecha (kg ha ⁻¹)	09-10	22991	7277	14347	55,58
	10-11	18596	9612	12798	21,54
Índice de cosecha	09-10	0,43	0,17	0,33	41,35
	10-11	0,36	0,18	0,29	25,16

Al igual que en soja, los rendimientos obtenidos en el primer período experimental fueron mayores que los del segundo, la Figura No. 6 ilustra rendimientos altos, con una diferencia máxima en torno a los 500 Kg. para el promedio de puntos de muestreo, y diferencias entre las medias de cada período, para cada cultivar, de 45 y 22%, MG 52 y DK 3940, respectivamente. Mayor biomasa a cosecha en el primer período, y mayores variaciones en todas las variables en el segundo año, producto de una época de siembra más y las características climáticas de ese año.

4.3.2 Dinámica del agua en el suelo

En ambos cultivos, y en los estadios fenológicos presentados en la Figura No. 7, es notorio el mayor contenido de agua en el suelo en el primer período experimental, en concomitancia con las precipitaciones ocurridas. Para el caso de girasol, promediando ambas profundidades y épocas de siembra del primer año de ensayos, en R1 los suelos tenían un 61% más de agua que los suelos con cultivos de igual estado del período siguiente, el mismo porcentaje se obtuvo para el momento de cosecha. En el caso de soja, en la cosecha donde podemos comparar años, los suelos presentaron un 41% más de agua en el primer año de siembra. En el segundo año, en ambos cultivos, se aprecia una leve tendencia a que en cada estadio fenológico el agua sea mayor en la época de siembra más tardía, estando en concordancia con los rendimientos obtenidos en las diferentes épocas de siembra de ese período.

a)



b)

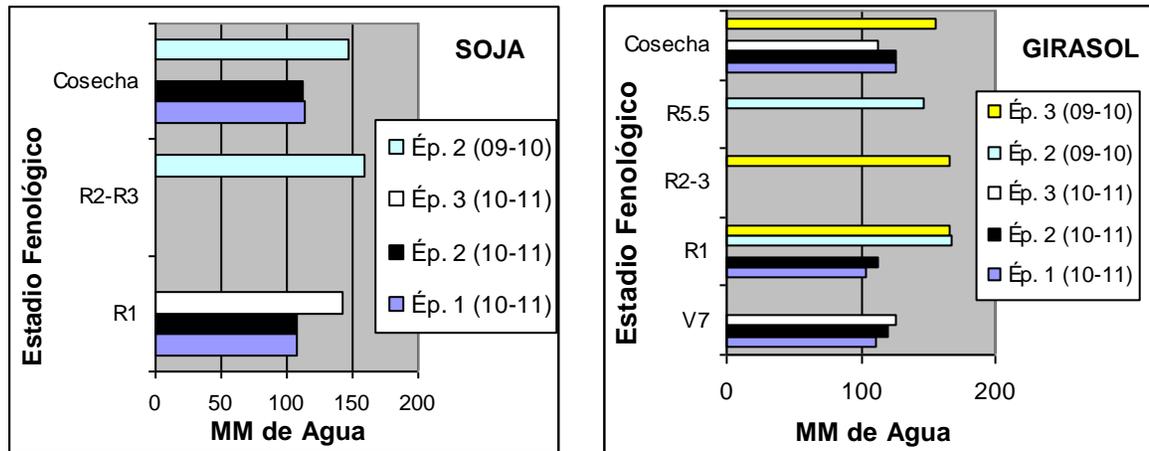
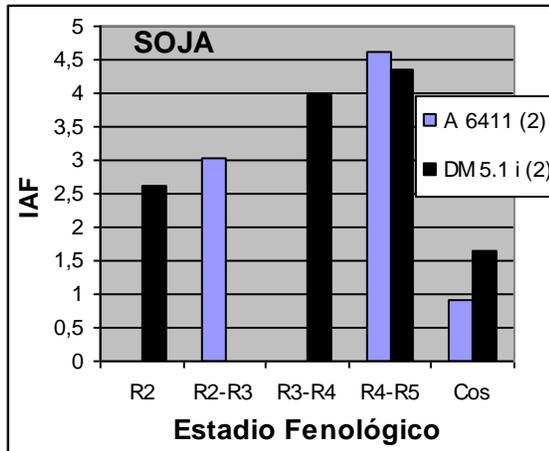


Figura No. 7: Milímetros de agua hasta 30 cm de suelo (a), y a más de 30 cm (b), según estadio fenológico para diferentes épocas de siembra. Promedio de cultivares y puntos de muestreo para ambos períodos experimentales.

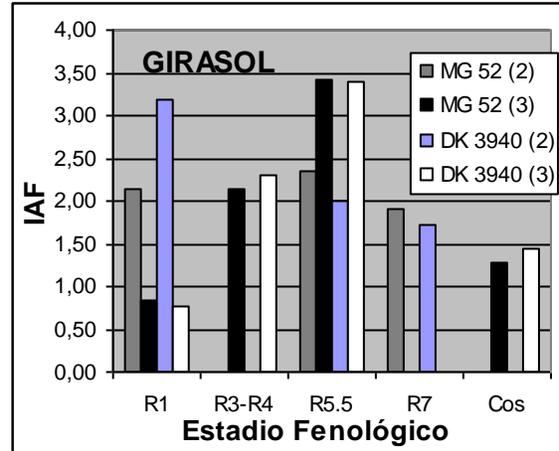
4.3.3 Índice de área foliar

Durante el periodo 2009-2010 en soja existió una leve diferencia entre los cultivares en el período considerado crítico del cultivo, menor a 0,5 puntos en el valor de este índice a favor del cultivar A 6411, posiblemente por las diferencias de largo de ciclo entre cultivares. En girasol, en el mismo período, no existieron tampoco prácticamente diferencias entre cultivares, pero si entre épocas de siembra, teniendo las épocas de siembra intermedias una notoria diferencia en R1 a las épocas tardías, y de un punto en el valor del IAF entre cultivares de esa época, diferencia que desapareció en la próxima medida. Esta diferencia a favor de las épocas intermedias se acompañó de un menor incremento en el valor de este índice al momento de la floración (R 5.5), para donde las épocas tardías mostraron un gran aumento en relación al estadio R1, siendo el valor de IAF alcanzado, mayor que las épocas intermedias.

a)



b)



c)

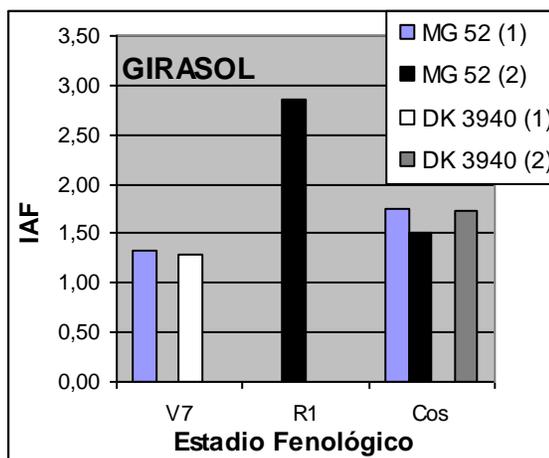


Figura No.8: Índice de área foliar según estadio fenológico para época de siembra temprana (1), intermedia (2), y tardía (3). Promedio de puntos de muestreo para el período 2009-2010 (a y b), y 2010-2011 (c).

En el segundo año de ensayos solo se contó con algunas medidas realizadas en las fechas temprana e intermedia de siembra en girasol. Si bien se midió en ambos cultivos en los estadios fenológicos preestablecidos, por cambios en los operarios se perdió gran parte de la información recabada en el dispositivo LAI 2000. Esto limitó para esta variable cumplir con la metodología planteada para la calibración y validación de la misma.

4.3.4 Acumulación de nitrógeno

En el año de validación del modelo, por diferentes motivos, los datos de las medidas de acumulación de nitrógeno en planta fueron menores en girasol, y en el caso de soja faltaron. En los experimentos destinados a la calibración del modelo, los datos disponibles fueron mayores. Comparando años, en uno de los cultivares de girasol el promedio de la acumulación de nitrógeno de sus puntos de muestreo, en un momento determinado, fue el doble en el año de Calibración vs. Validación (MG 52, R1: 101 vs. 191 Kg. /ha).

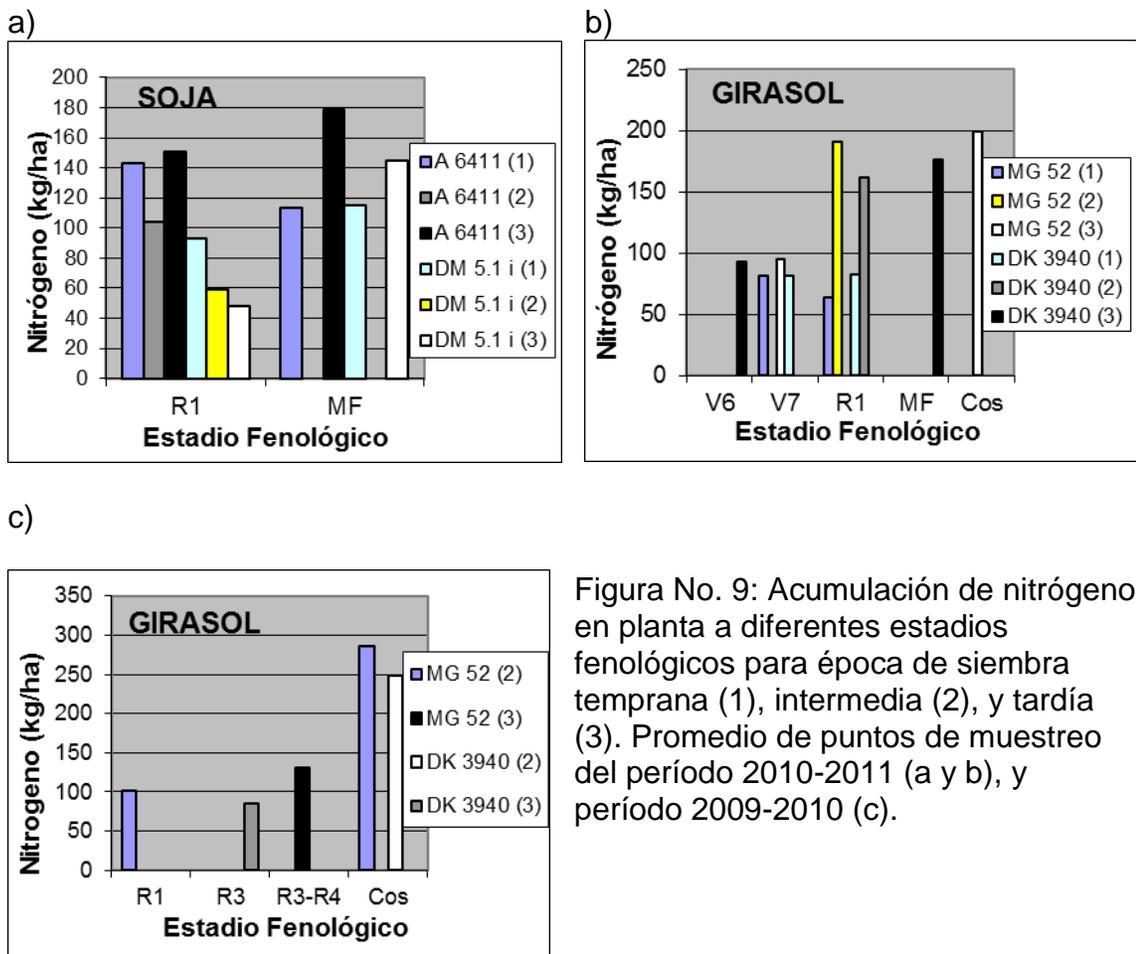


Figura No. 9: Acumulación de nitrógeno en planta a diferentes estadios fenológicos para época de siembra temprana (1), intermedia (2), y tardía (3). Promedio de puntos de muestreo del período 2010-2011 (a y b), y período 2009-2010 (c).

4.4 RESULTADOS CALIBRACIÓN

Los siguientes cuadros presentan parámetros genéticos de importancia, los valores por “default” (tal cual aparecen en CropSyst), y las modificaciones realizadas en algunos de ellos durante la calibración de los cultivares.

Cuadro No. 4: Parámetros genéticos relevantes de soja. Valores por default y modificaciones realizadas en la calibración de los cultivares.

PARAMETERS	DEFAULT	A 6411	DM 5.1 i
Base temperature (°c)	6	3	3
Cutoff temperature (°c)	25	22	22
Canopy extinction coefficient for total (global) solar radiation	0, 47	0, 5	0, 5
Evapotranspiration crop coefficient at full canopy	1, 00	1, 05	1, 05
Maximum water uptake (mm/day)	12, 00	10, 00	10, 00
Leaf water potential at the onset of stomatal closure (-J/kg)	-1000	-1000	-1000
Wilting leaf water potential (-J/kg)	-1500	-1600	-1600
Above ground biomass transpiration coefficient (K) for annuals (Pa)	3, 50	5, 00	5, 00
Means daily temperature that limits early growth (°c)	10	20	20
Maximum radiation use efficiency (unstressed, low vapor pressure deficit) (g/MJ)	2	1, 32	2
Maximum expected leaf area index (LAI) (m ² /m ²)	7, 00	5, 00	5, 00
Fraction of the max. LAI at physiological maturity	0, 70	0, 80	0, 80
Emergence (°c-days)	100	104	100
Maximum root depth (°c-days)	1040	1327	1100
End of vegetative growth (°c-days)	1200	1420	1300
Begin flowering (°c-days)	700	1300	1000
Begin filling (°c-days)	930	1400	1400
Physiological maturity (°c-days)	1750	2500	2400
Maximum rooting depth (m)	1, 70	1, 50	1, 50
Sensitivity to water and nitrogen stresses during flowering	0, 50	0, 50	0, 50
Duration of grain filling period (days) (unstressed)	30	30	35
Leaf area duration (°c-days)	1200	700	700
Unstressed harvest index	0,3	0, 50	0, 50

-Base temperature ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura base. Mejor acuerdo -en variables de importancia- se obtuvo al disminuirla. Implica que los cultivos acumulen grados días para alcanzar una nueva etapa de desarrollo a temperaturas menores, lo que permitió -junto con el ajuste de fenología- una mejor simulación del crecimiento y desarrollo de los cultivos sembrados.

-Cutoff temperature ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura de corte. Se especifica cuándo seleccionamos la resolución diaria de tiempo térmico en el programa. Se refiere a la temperatura por la cual por encima de ésta el tiempo térmico no se acumula. En la calibración se mantuvo el rango de temperatura para la acumulación de grados días, pero se logró un mejor ajuste con los cultivos sembrados disminuyendo 3°C por debajo del valor propuesto en ambos parámetros.

-Maximum water uptake (mm/day): Máxima absorción de agua. Es la esperable en un cultivo completamente desarrollado, verde, que cubre el suelo, con disponibilidad hídrica, y condiciones ambientales de gran demanda atmosférica. Al disminuir 2 mm diarios en relación al valor propuesto, se consiguió un mejor acuerdo en las variables de mayor importancia a partir de una absorción de agua máxima menor para las condiciones de uso impuestas en este trabajo.

-Above ground biomass transpiration coefficient (K) for annuals (Pa): Este valor representa la producción de biomasa aérea por metro de transpiración bajo condiciones de déficit de densidad de vapor atmosférico de (3.0-9.0 ((kg/m^2).kPa)/m). Se ubicó por encima del valor propuesto, produciendo más biomasa que la propuesta por metro de transpiración. Esto podría atribuirse, al menos en parte, a las diferencias en la demanda ambiental del sitio en los que se realizaron los experimentos. De acuerdo con esto, Abbate et al. (2004), informaron reducciones en la eficiencia en el uso del agua entre ambientes de Argentina, por incrementos en el déficit de presión de vapor.

-Wilting leaf water potential (-J/kg): Potencial hídrico de marchitez de hoja. Indica el potencial hídrico en la hoja (y el suelo) cuando el cultivo ya no puede extraer el agua del suelo. Al disminuirse 100 J/kg en el cultivo simulado las hojas se marchitan a un potencial hídrico menor. Recordemos que el crecimiento limitado por agua se calcula utilizando los parámetros que limitan directamente la acumulación de biomasa, como lo es éste, obteniendo así un mejor ajuste en dicha variable.

-Means daily temperature that limits early growth ($^{\circ}\text{C}$): Temperatura media diaria para limitar el crecimiento inicial. 10°C mayor al valor por default, con esto se obtuvo un mejor ajuste del crecimiento y resultado final en las

variables rendimiento y biomasa a cosecha. El crecimiento vegetativo es pequeño o casi nulo en presencia de temperaturas próximas o inferiores a ésta, quedando frenado por debajo de la temperatura base.

-Maximum expected leaf area index (LAI) (m^2/m^2): Valor máximo esperado en el índice de área foliar. Al calibrar cada cultivar, este valor se ubicó dos puntos por debajo del valor propuesto, con esto se evitaría –en teoría- que CropSyst simule un canopeo demasiado denso, con mayor cantidad de hojas viejas en las partes inferiores de la planta con aportes insignificantes a la tasa de crecimiento del cultivo, además de otras implicancias de este desajuste.

-End of vegetative growth ($^{\circ}C$ -days): Fin del crecimiento vegetativo. El valor de este parámetro fue mayor al propuesto, con esto más tiempo el cultivo simulado se mantiene destinando fotoasimilados al crecimiento vegetativo, y aproximando a CropSyst a un rendimiento y biomasa a cosecha semejantes al de los cultivos sembrados en parcelas experimentales.

-Begin flowering ($^{\circ}C$ -days): Comienzo de floración. Grados días necesarios para alcanzar esta etapa. El valor final utilizado es 300-600 $^{\circ}C$ /día menor al valor propuesto, alcanzando esta etapa los cultivares calibrados antes y comenzando a destinar fotoasimilados para las estructuras reproductivas encargadas de la formación del rendimiento.

-Begin filling ($^{\circ}C$ -days): Comienzo del llenado. 470 $^{\circ}C$ -día menos que el cultivar genérico. Al adelantar el comienzo del llenado los cultivares simulados comenzaron al mismo tiempo que los sembrados, incidiendo así en el crecimiento de los mismos (peso de granos), por el momento, la duración, y las condiciones ambientales durante dicha fase.

-Physiological maturity ($^{\circ}C$ -days): Madurez fisiológica. En torno a 650 y 750 $^{\circ}C$ -día por debajo, determinando de esta forma que la fijación de carbono finalice en un tiempo semejante en los cultivos, y ajustando así variables implicadas con este parámetro, como lo es el rendimiento del cultivo.

-Leaf area duration ($^{\circ}C$ -days): Corresponde a los grados-día transcurridos entre la aparición y la senescencia de una nueva hoja. Este coeficiente fue menor que el del cultivar genérico, con lo que las hojas se renuevan a un mayor ritmo, incidiendo así en la tasa de crecimiento del cultivo y ajustando de mejor forma al software con el crecimiento de los cultivares.

Unstressed harvest index: Índice de cosecha de un cultivo sin estrés. Hay que tener en cuenta que algunos cultivos (como la soja), dejan caer una cantidad considerable de hojas antes de la cosecha. Por lo tanto, se observan

índices de cosecha que no incluyen las hojas caídas son más altos de lo requerido por el modelo, que no simula la pérdida de biomasa, debido a hojas caídas.

Cuadro No. 5: Parámetros genéticos relevantes de girasol. Valores por default y modificaciones realizadas en la calibración de los cultivares.

PARAMETERS	DEFAULT	MG 52	DK 3940
Base temperature (°C)	6	3	6
Cutoff temperature (°C)	25	22	25
Canopy extinction coefficient for total (global) solar radiation	0,6	0,6	0,65
Evapotranspiration crop coefficient at full canopy	1,1	1,1	1,1
Maximum water uptake (mm/day)	10	10	12
Leaf water potential at the onset of stomatal closure (-J/kg)	-1100	-1100	-1100
Wilting leaf water potential (-J/kg)	-1600	-1800	-1800
Above ground biomass transpiration coefficient (K) for annuals (Pa)	6	6	6,5
Means daily temperature that limits early growth (°C)	10	20	20
Maximum radiation use efficiency (unstressed, low vapor pressure deficit) PAR (g/MJ)	3	4	4
Maximum expected leaf area index (LAI) (m ² /m ²)	5	7	5
Fraction of the max. LAI at physiological maturity	0,4	0,8	0,8
Emergence (°C-days)	100	80	90
Maximum root depth (°C-days)	1040	1040	1040
End of vegetative growth (°C-days)	780	780	1040
Begin flowering (°C-days)	800	1250	1300
Begin filling (°C-days)	950	1450	1450
Physiological maturity (°C-days)	1550	2000	2000
Maximum rooting depth (m)	1,8	2	1,7
Sensitivity to water and nitrogen stresses during flowering	0,1	0,5	0,2
Duration of grain filling period (days) (unstressed)	30	30	30
Leaf area duration (°C-days)	900	1400	1000
Unstressed harvest index	0,28	0,5	0,5

Los intentos de calibración en este cultivo no dieron resultados favorables, por ello no se profundiza en el trabajo realizado en cada uno de los coeficientes.

La fenología de ambos cultivares fue ajustada de forma satisfactoria, modificando los parámetros relacionados con la misma a partir de lo observado en los ensayos de campo. Seguido, la búsqueda de que CropSyst realizara una adecuada simulación de las variables consideradas, a través de la labor realizada sobre el pool de parámetros que se citan en el cuadro anterior y otros no incluidos, no dio resultados positivos. Hubo problemas para simular de buena forma algunas variables, algo que ocurrió también en soja (a continuación se presentan los resultados y discusiones particulares de cada caso), pero esto no imposibilitó que en ese cultivo fuera posible simular adecuadamente otras variables. Volviendo a girasol, el rendimiento en grano o la biomasa a cosecha, como punto de partida de la calibración por su importancia práctica, resultó un trabajo tortuoso, donde no se obtuvieron los resultados deseados. El resto de las variables, no menos importantes en el andamiaje de las anteriores, algunas de ellas como el contenido de nitrógeno o el contenido de agua hasta 30 cm de suelo, no dieron errores de gran magnitud, pero poco valieron en este trabajo en el ajuste de dichas variables, sumado al trabajo directo sobre parámetros de mayor impacto en la modificación de las mismas.

Recordemos que en la revisión bibliográfica, más allá de que algunos trabajos hacen hincapié en algunas carencias del modelo, todos lograron una adecuada simulación del rendimiento en grano. Algo escapó al entendimiento del software, que sobre los escenarios aquí impuestos le haya permitido una mejor performance. Problemas del modelo no identificados directamente en este trabajo, o factores que interactuaron con los cultivos en los ensayos y “afectaron” sus resultados serían las causales.

4.4.1 Rendimiento y biomasa a cosecha

4.4.1.1 Soja

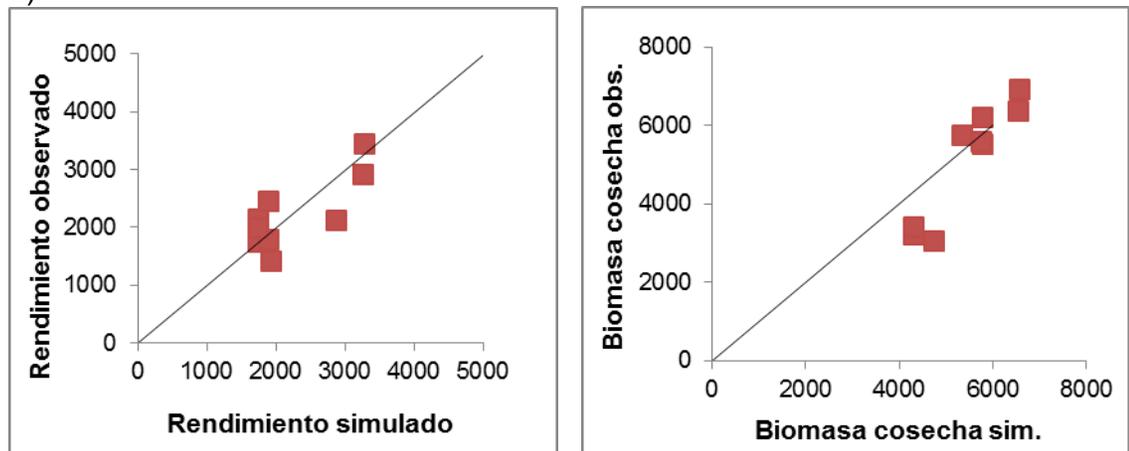
En ambos cultivares y variables, a excepción del ajuste del rendimiento del cultivar DM 5.1 i (RCME (%) 25; Justo), los resultados estuvieron en el rango de ajuste señalados por Jamieson et al. (1991), bueno, por presentar valores de la RCME (%) entre 10 y 20.

Cuadro No. 6: Resultados del ajuste de la calibración del rendimiento y biomasa a cosecha en soja. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME (kg/ha)	RCME (%)	Media Obs. (kg/ha)	Media Sim. (kg/ha)
A 6411	Rendimiento	9	299	13	2220	2266
DM 5.1 i		9	608	25	2452	2795
A 6411	Biomasa	9	776	15	5115	5461
DM 5.1 i	Cosecha	9	632	12	5158	5591

A continuación los gráficos de línea 1:1, para ambos cultivares y las diferentes fechas de siembra, ilustran la totalidad de los resultados de observación junto a su correspondiente valor simulado en ambas variables.

a)



b)

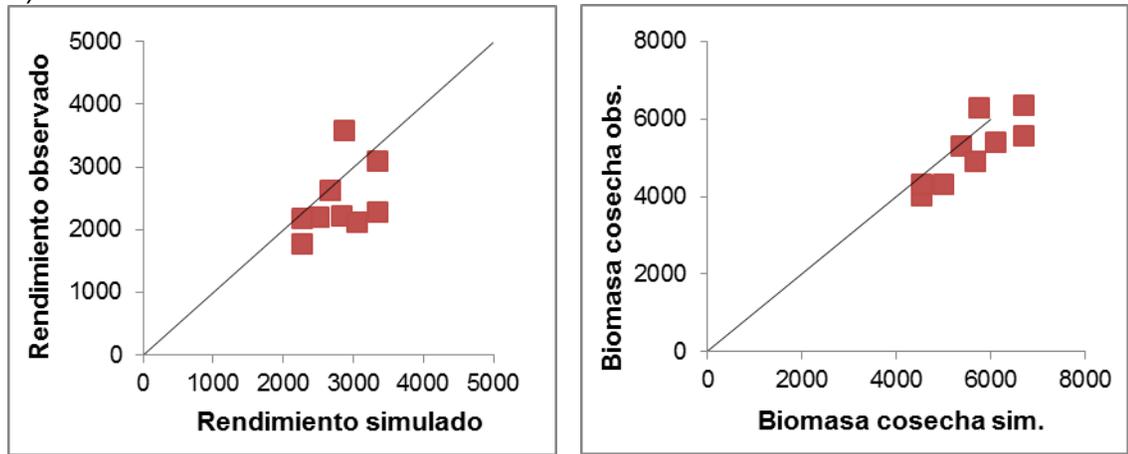


Figura No. 10: Lineal 1:1 para la calibración del rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha). Cultivar A 6411 (a), y DM 5.1 i (b).

El ajuste obtenido en el índice de cosecha también fue bueno, RCME (%): 19 y 12, cultivar A 6411 y DM 5.1 i, respectivamente. Con menor variación en CropSyst, CV (%): 21,75 vs. 18,25; 11,78 vs. 0; Observado vs. Simulado, A 6411 y DM 5.1 i, respectivamente.

4.4.1.2 Girasol

El caso de girasol es más complejo, no lográndose un adecuado ajuste del programa para estas variables. El único caso en que se logró una simulación satisfactoria (los rendimientos del cultivar DK 3940), en una primer instancia el valor obtenido en la RCME (%) era de 72, el 15% presentado en el Cuadro No. 7 es producto de la eliminación de una época de siembra, la más tardía, en la que veíamos que los rendimientos caían, cuando en soja y en el cultivar MG 52 pasaba lo contrario conforme mejoraba el escenario de precipitaciones. Esto posiblemente estuvo asociado a problemas de enfermedades y pájaros consecuencia del menor largo del ciclo de este cultivar.

Cuadro No. 7: Resultados del ajuste de la calibración del rendimiento y biomasa a cosecha en girasol. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME (kg/ha)	RCME (%)	Media Obs. (kg/ha)	Media Sim. (kg/ha)
MG 52	Rendimiento	8	1896	55	3433	5212
DK 3940		5	578	15	3910	4153
MG 52	Biomasa	8	4263	42	10204	10424
DK 3940	Cosecha	6	5583	42	13388	8380

En la Figura No. 11 se observa que en el cultivar MG 52 los rendimientos siempre fueron sobrestimados por el programa, siendo mayores los desajustes en la primer época, en la que se obtuvieron los rendimientos más bajos. A medida que aumentaron los rendimientos (época 2 y 3), el desajuste fue menor, y a pesar de los ajustes realizados en los diferentes parámetros del programa no se logró superar el 41% en la relación de la RCME (época 3). La biomasa no mostró una tendencia clara como el rendimiento en este cultivar, si en el cultivar DK 3940, en donde la misma fue subestimada sistemáticamente. El índice de cosecha en los ensayos tuvo una gran variación entre puntos de muestreo y fechas de siembra, no así sus correspondientes valores simulados, CV (%): 36,12 vs. 0; y 25,16 vs. 5,01; Observado vs. Simulado, MG 52 y DK 3940, respectivamente. Y su ajuste, RCME (%): 63, MG 52; y 104, DK 3940.

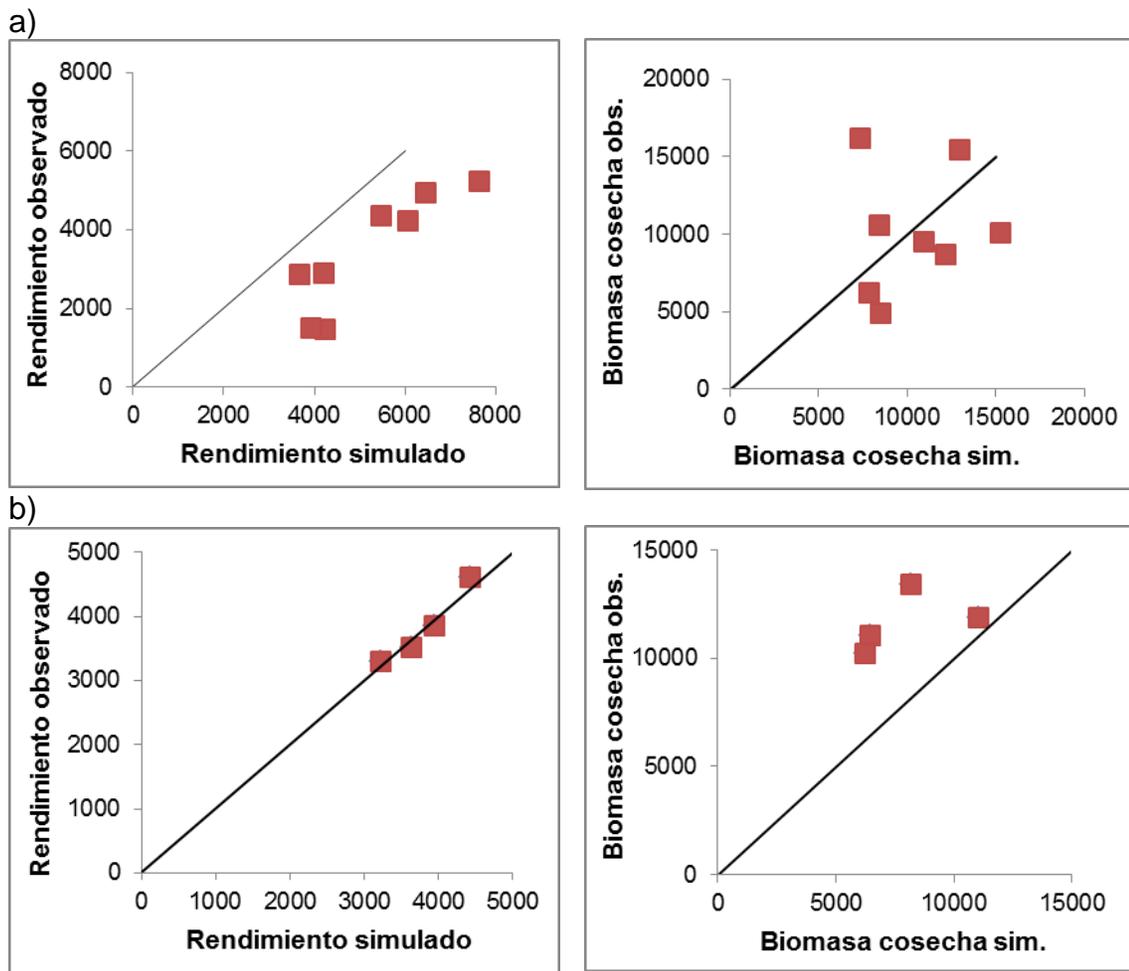


Figura No. 11: Lineal 1:1 para la calibración del rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha). Cultivar MG 52 (a), y DK 3940 (b).

4.4.2 Índice de área foliar, acumulación de nitrógeno, y contenido de agua en el suelo

4.4.2.1 Soja

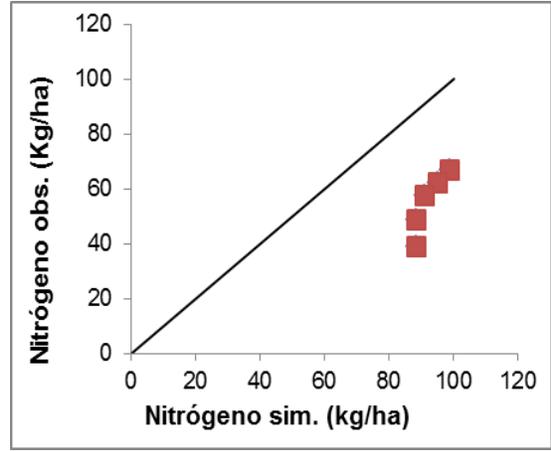
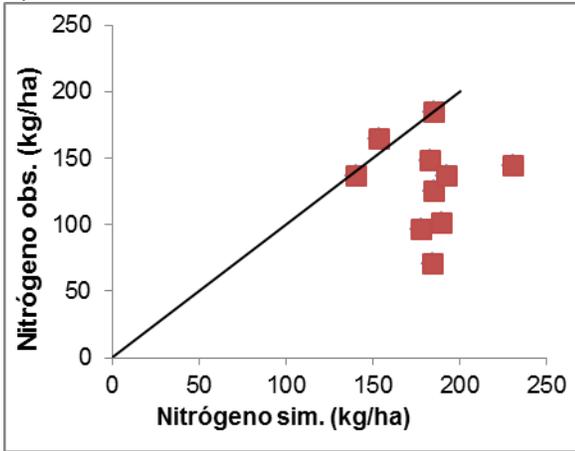
A pesar del acuerdo logrado en la calibración de las variables rendimiento y biomasa a cosecha, los resultados de estas variables no obtuvieron un buen ajuste, con valores de la RCME (%) pobres, a excepción de uno de ellos en que la simulación fue justa (agua hasta 30 cm cultivar DM 5.1 i, 27%). El índice de área foliar no se incluye por la pérdida de datos medidos.

Cuadro No. 8: Resultados del ajuste de la calibración de absorción de nitrógeno, contenido de agua hasta 30 cm, a más de 30 cm y total, en soja. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.

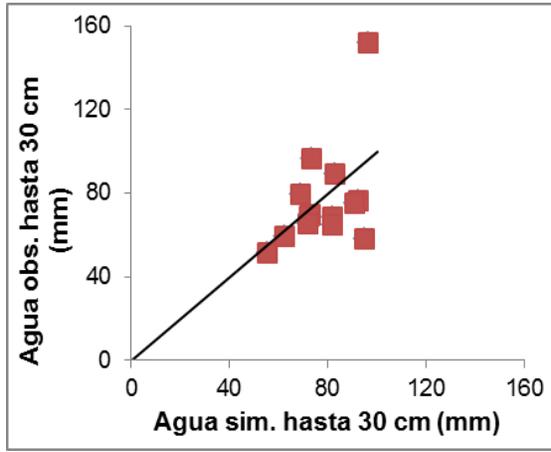
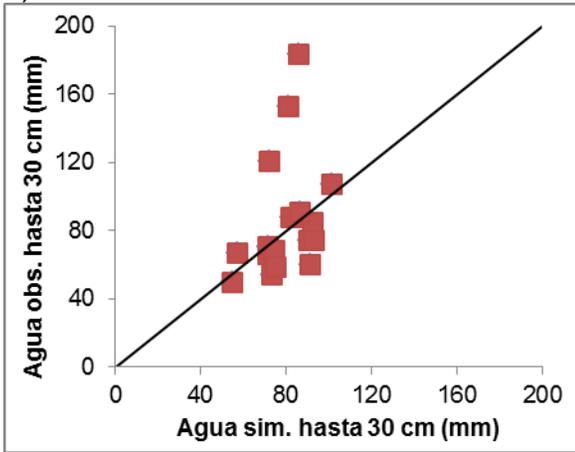
Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME	RCME (%)	Media Obs.	Media Sim.
A 6411	Nitrógeno (kg/ha)	12	66	47	142	196
DM 5.1 i		7	60	92	66	120
A 6411	Agua hasta 30 cm (mm)	18	33	39	85	79
DM 5.1 i		14	21	27	77	78
A 6411	Agua 30 cm a más (mm)	17	51	43	119	151
DM 5.1 i		14	90	78	115	168
A 6411	Agua Total (mm)	35	43	42	102	114
DM 5.1 i		28	66	68	96	126

En la Figura No. 12 se aprecia una clara sobrestimación del programa en las variables acumulación de nitrógeno en planta y contenido de agua a más de 30 cm de suelo, con mejor ajuste conseguido en el cultivar A 6411 que DM 5.1 i, en ambos casos. El contenido de agua hasta 30 cm de suelo, es la variable en la que se obtuvo la menor magnitud de errores de simulación

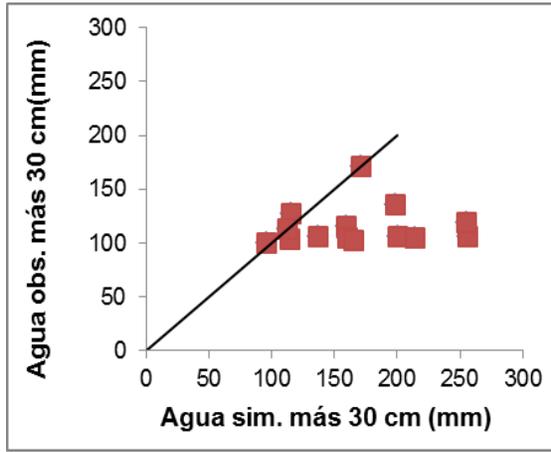
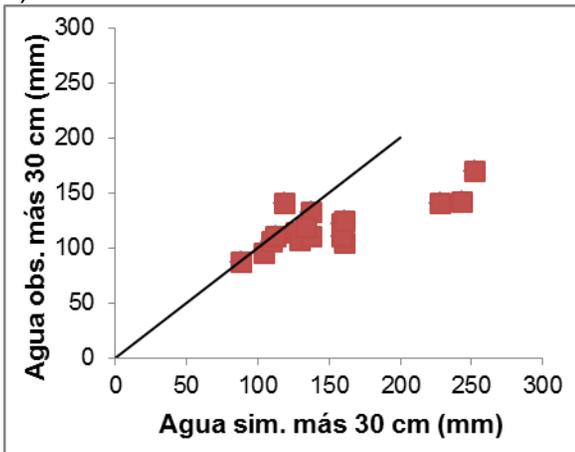
a)



b)



c)



d)

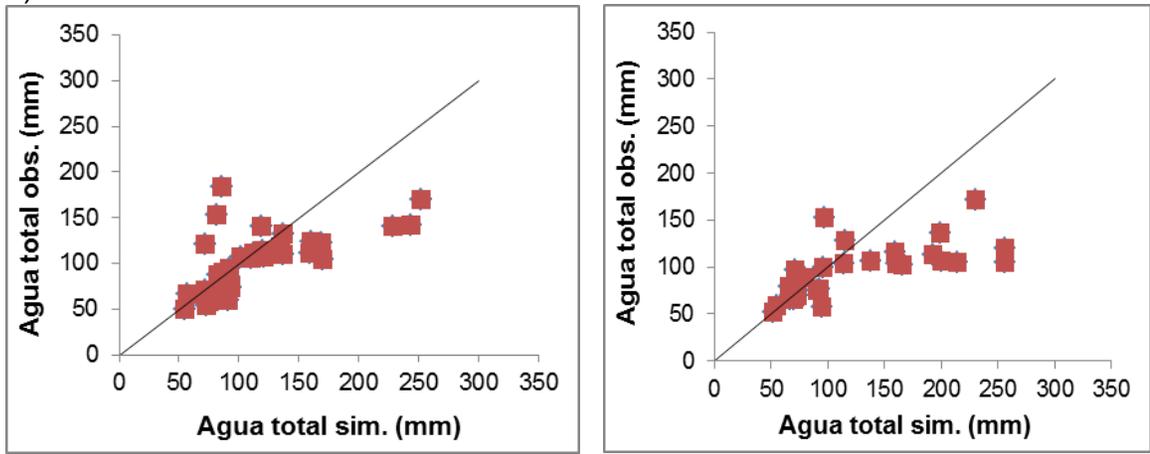


Figura No. 12: Lineal 1:1 para la calibración de la absorción de nitrógeno (a), contenido de agua hasta 30 cm (b), a más de 30 cm (c), y total (d); en diferentes estadios fenológicos y diferentes fechas de siembra. Cultivar A 6411 (izquierda) y DM 5.1 i (derecha).

En la simulación del contenido de agua total del suelo, si bien los errores de mayor magnitud para el contenido de agua a más de 30cm en el cultivar DM 5.1 se “diluyen”, el ajuste logrado en ambos cultivares fue pobre. Vemos en la figura anterior que el desajuste en estas variables, es producto de la cantidad de agua, y no asociado a una mala distribución en el perfil.

En cuanto a la acumulación de nitrógeno, al omitir inicializar antes los escenarios productivos, el software puede estar degradando mayor cantidad de materia orgánica del suelo en vías de estabilizarse, y liberando un mayor contenido de nitrógeno. La Figura No. 13 muestra como los cultivos simulados tuvieron un consumo de “lujo”, que repercutió en una curva de dilución del nutriente mayor que en la realidad, y produzca tal desacuerdo con lo observado.

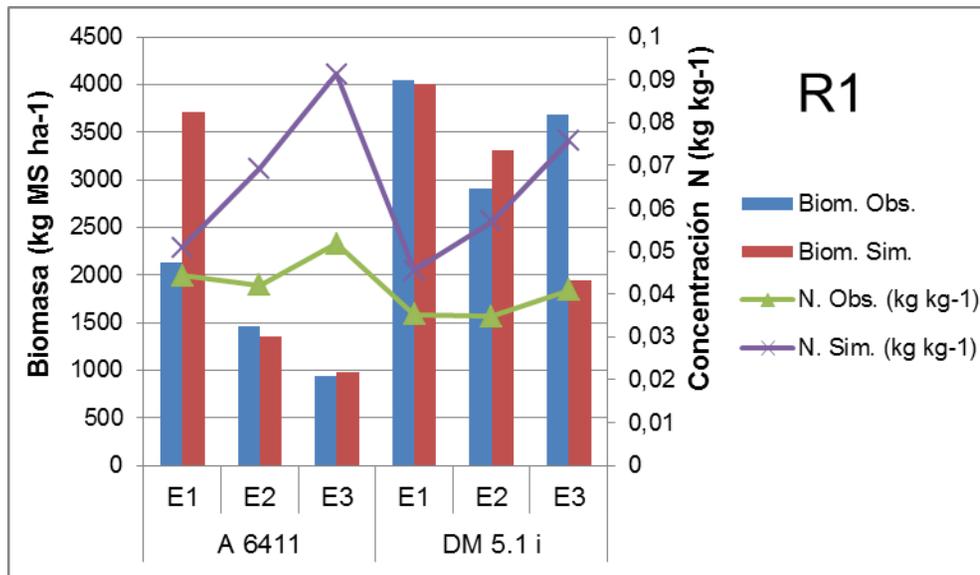


Figura No. 13: Biomasa a cosecha y concentración de nitrógeno en planta a la cosecha, observada y simulada, para ambos cultivares en sus tres fechas de siembra. Período 2010-2011.

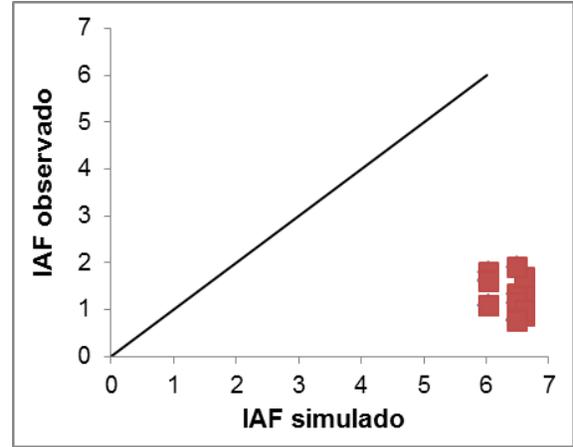
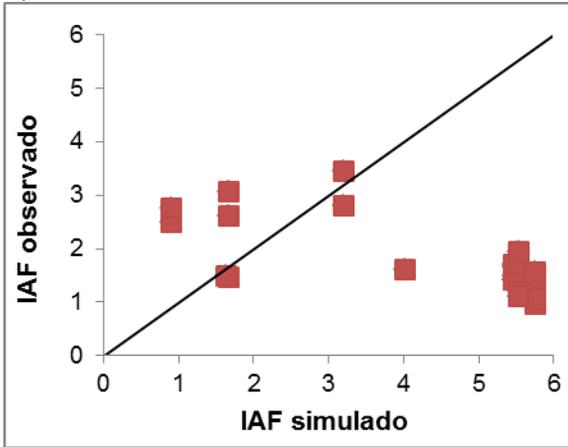
4.4.2.2 Girasol

Al igual que en soja, el agua hasta 30 cm obtuvo los mejores resultados (acuerdo justo en ambos cultivares), seguida de la acumulación de nitrógeno, con valores pobres, pero con errores de menor importancia que el agua a más de 30 cm y el índice de área foliar.

Cuadro No. 9: Resultados del ajuste de la calibración del IAF, absorción de nitrógeno, contenido de agua hasta 30 cm, a más de 30 cm y total, en girasol. Promedio de puntos de muestreo y épocas de siembra.

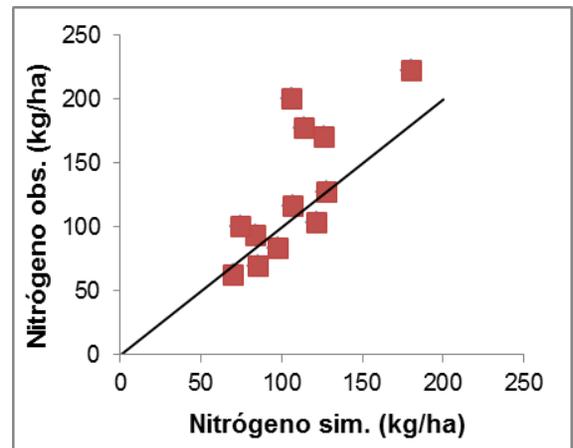
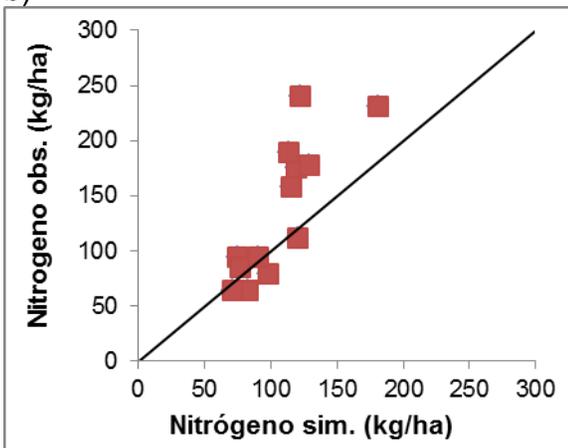
Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME	RCME (%)	Media Obs.	Media Sim.
MG 52	IAF (m ²)	24	3	191	2	4
DK 3940		15	5	399	1	6
MG 52	Nitrógeno (kg/ha)	13	49	36	136	107
DK 3940		12	39	31	127	108
MG 52	Agua hasta 30 cm (mm)	29	21	28	75	68
DK 3940		24	16	23	72	68
MG 52	Agua 30 cm a más (mm)	30	68	58	115	168
DK 3940		24	63	52	120	154
MG 52	Agua Total (mm)	59	51	53	95	119
DK 3940		48	46	48	96	111

a)

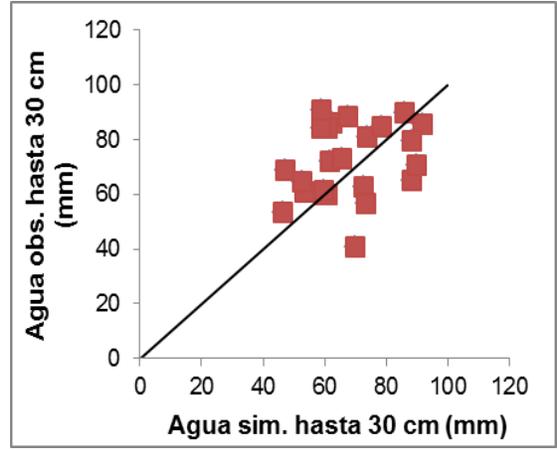
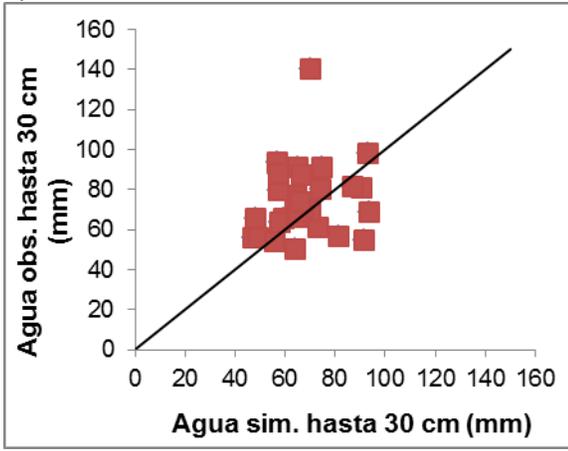


En el cultivar MG 52 estaban disponibles medidas realizadas en dos épocas de siembra (temprana e intermedia), lo que dio un resultado casi 50% menor de la RCME (%) como veíamos en el Cuadro No. 9. En el gráfico, los puntos en que CropSyst tiende a subestimar las medidas, corresponden a la fecha de siembra intermedia, y la temprana corresponde al grupo de puntos sobrestimado por el modelo, como pasó también en el cultivar DK 3940.

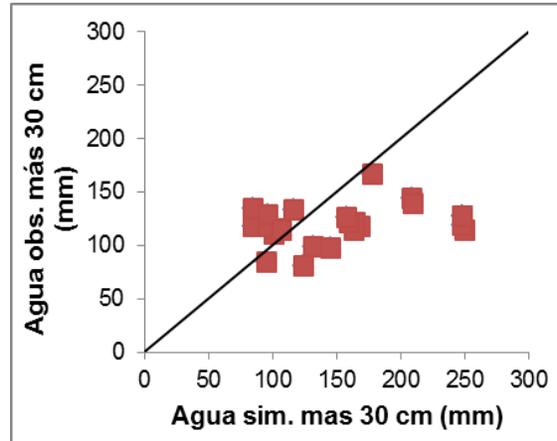
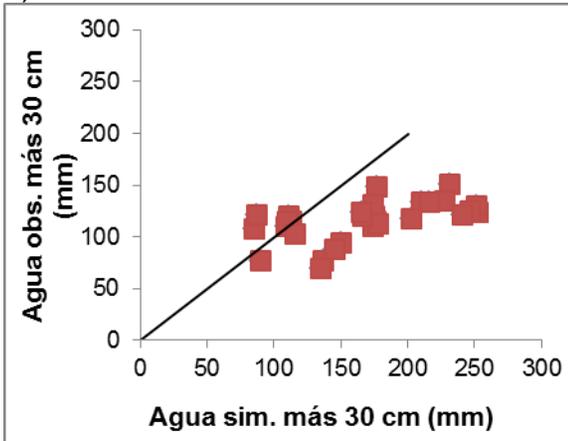
b)



c)



d)



e)

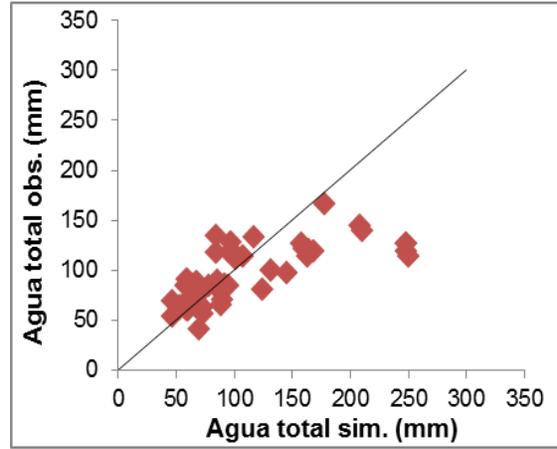
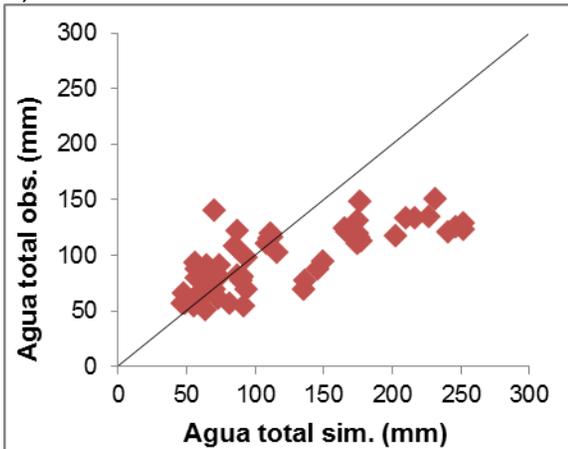


Figura No. 14: Lineal 1:1 para la calibración del índice de área foliar (a), absorción de nitrógeno (b), contenido de agua hasta 30 cm (c), a más de 30 cm (d), y total (e); en diferentes estadios fonológicos y diferentes fechas de siembra. Cultivar MG 52 (izquierda) y DK 3940 (derecha).

A pesar de la magnitud de los errores, en todos los casos el cultivar DK 3940 fue mejor simulado que el cultivar MG 52, 5% en promedio para estas tres variables. El contenido de agua a más de 30 cm de suelo fue sobrestimado por el modelo, como lo hizo también en el cultivo de soja, la mayor sobrestimación, en orden de importancia, corresponde con las épocas de siembra temprana (RCME (%) 65), intermedia (RCME (%) 57), y tardía (RCME (%) 30). Esta tendencia la podríamos asociar con los desajustes en el índice de área foliar, y con el rendimiento en grano de cada época, en el cultivar MG 52 mayor era el desajuste a medida que la época de siembra era más temprana.

4.5 RESULTADOS VALIDACIÓN

Esta sección se remite a presentar datos correspondientes a la validación de soja. Los resultados de girasol, al no haber logrado una calibración satisfactoria, se incluye en el capítulo anexos.

4.5.1 Rendimiento y biomasa a cosecha en soja

La totalidad de resultados obtenidos fueron satisfactorios. Incluso mejor en el caso del ajuste del rendimiento del cultivar DM 5.1 i, que en la instancia de calibración era justo (RCME (%) 25), y aquí pasó a ser bueno.

Cuadro No. 10: Resultados del ajuste de la validación del rendimiento y biomasa a cosecha en soja. Promedio de puntos de muestreo.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME (kg/ha)	RCME (%)	Media Obs. (kg/ha)	Media Sim. (kg/ha)
A 6411	Rendimiento	3	526	12	4402	3951
DM 5.1 i		3	333	7	4471	4487
A 6411	Biomasa	--	--	--	--	--
DM 5.1 i	Cosecha	3	1803	17	10351	8974

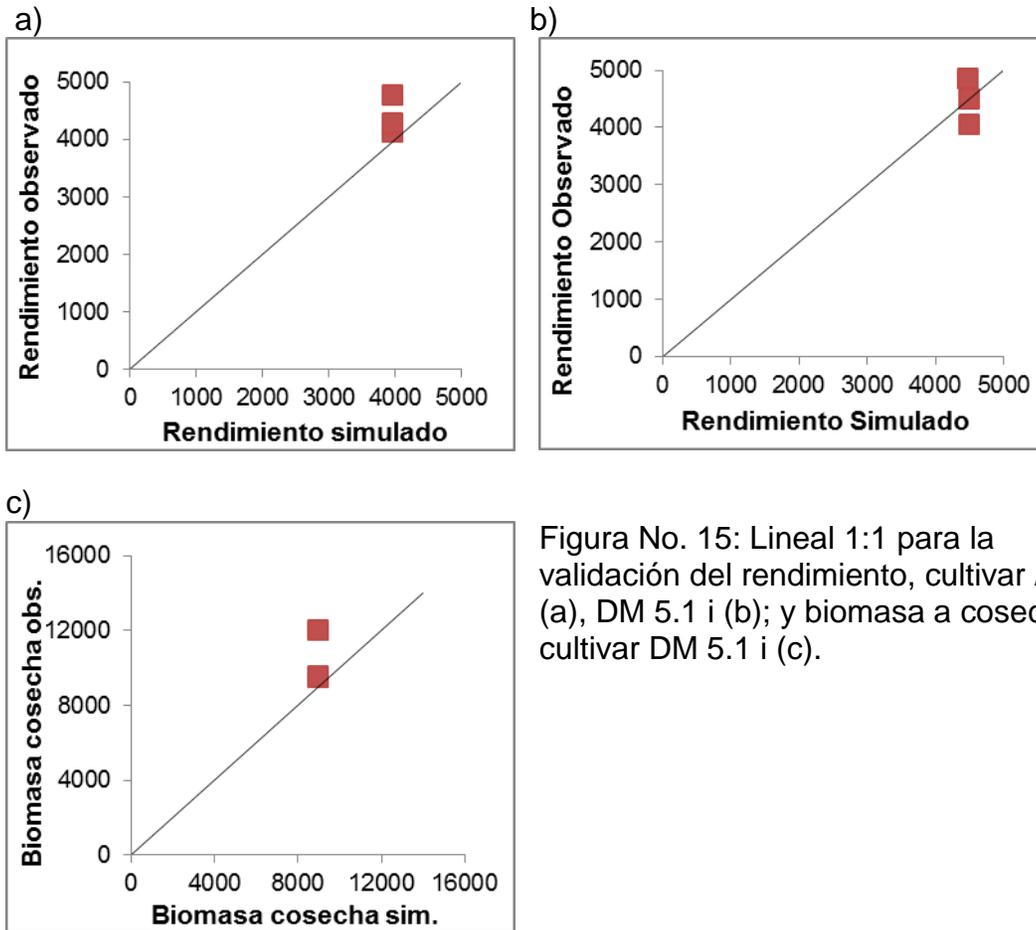


Figura No. 15: Lineal 1:1 para la validación del rendimiento, cultivar A 6411 (a), DM 5.1 i (b); y biomasa a cosecha, cultivar DM 5.1 i (c).

El número de observaciones en este caso es menor, correspondiente a la fecha de siembra intermedia. La validación de biomasa del cultivar A 6411 no se realizó en esta instancia por la ausencia de datos, la misma se presenta en otra sección de este capítulo.

Varias experiencias citadas en la revisión bibliográfica eran coincidentes en la mejora de la performance de simulación de variables como el rendimiento en grano y la biomasa ante condiciones de recursos no limitantes (suelos con mayor capacidad de almacenaje de agua, cultivos regados, o ausencia de estrés hídrico). Recordemos que este año las precipitaciones registradas fueron un 230% superior a las del promedio del mismo período de la serie histórica, lo que mejoró aún más el buen ajuste obtenido cuándo se calibró el modelo.

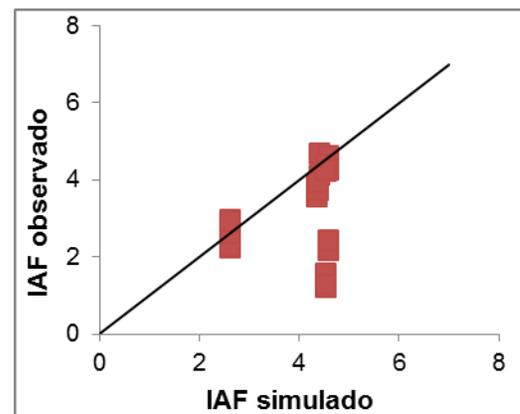
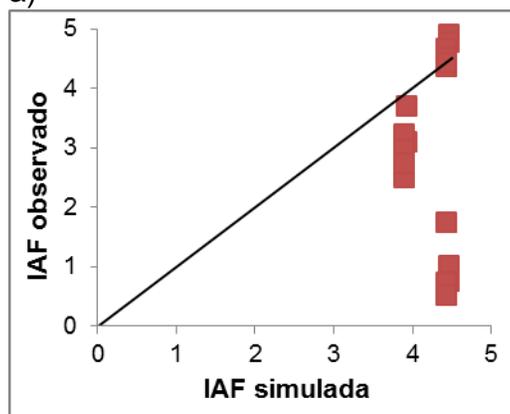
4.5.2 Índice de área foliar, acumulación de nitrógeno, y contenido de agua en el suelo en soja

El mejor ajuste corresponde nuevamente al contenido de agua hasta 30 cm, incluso mejor que en la calibración, ya que ambos cultivares se encuentran dentro del rango de acuerdo justo. Los resultados del contenido de agua a más de 30 cm siguen siendo pobres. Las medidas de la acumulación de nitrógeno en este año no estuvieron disponibles, pero si se incluyen las pruebas realizadas en el índice de área foliar, en donde no se obtuvo un buen resultado. La Figura No. 16 muestra la totalidad de observaciones y los valores simulados por CropSyst.

Cuadro No. 11: Resultados del ajuste de la validación del IAF, contenido de agua hasta 30 cm, y a más de 30 cm, en soja. Promedio de puntos de muestreo.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME	RCME (%)	Media Obs.	Media Sim.
A 6411	IAF (m ²)	18	2,14	75	2,85	4,27
DM 5.1 i		24	1,50	48	3,15	4,02
A 6411	Agua hasta 30 cm (mm)	6	34,16	27	127	94
DM 5.1 i		6	24,22	21	113	91
A 6411	Agua 30 cm a más (mm)	6	95,74	64	150	244
DM 5.1 i		6	88,98	57	156	242

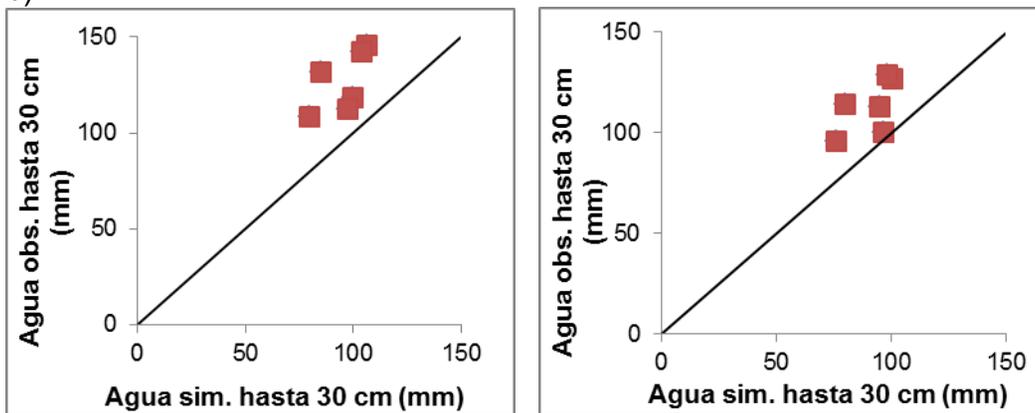
a)



El IAF fue sobrestimado en los diferentes estadios fenológicos por CropSyst en ambos cultivares. La experiencia local reportada (Baroffio y Ramos, 2009), con similares resultados de ajuste de esta variable, lograron calibrar y validar de buena forma el rendimiento y la biomasa a cosecha. Explicado por el buen ajuste en la intercepción de radiación obtenida, RCME

(%) 18. Manifestando en su trabajo la mayor importancia relativa que tiene lograr un adecuado ajuste en esa variable en vías de obtener una buena performance en la simulación de variables de mayor importancia práctica. Un trabajo realizado en Chile, utilizando el modelo en trigo (Garcia de Cortazar, 2003), realizó un análisis de sensibilidad de algunos parámetros genéticos que incluye el programa con el propósito de lograr un mejor ajuste de esta variable. Identificó dos con mayor importancia (partición hoja-tallo, y área foliar específica) en la tasa de crecimiento del IAF, y notó que los valores genéticos de CropSyst eran los que provocaban tal desajuste, a pesar de esto, al modificarlos y conseguir un mejor ajuste, en algunas zonas el programa sobrestimaba el valor, pero aun así, el autor propone que con adecuado ajuste del parámetro coeficiente de extinción de la luz, valores superiores de IAF no modificaban la tasa fotosintética en más de un 5 %.

b)



c)

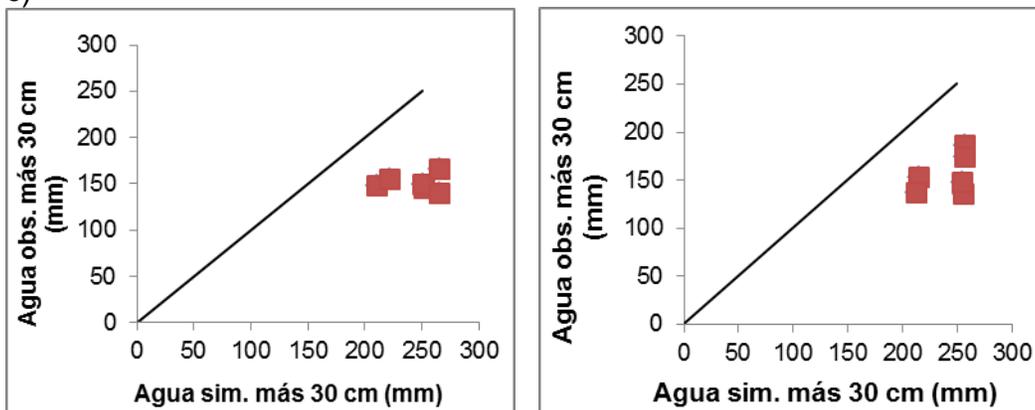


Figura No. 16: Lineal 1:1 de la validación del índice de área foliar (a), contenido de agua hasta 30 cm (b), y a más de 30 cm (c), a diferentes estadios fonológicos. Cultivar A 6411 (izquierda) y DM 5.1 i (derecha).

La sobrestimación en ambos años del contenido de agua en profundidad a pesar del mayor contenido de agua en el suelo este año, hace pensar que CropSyst esté subestimando algunos mecanismos de pérdida de agua, como lo son la escorrentía, el drenaje profundo o la evapotranspiración. En cuanto a que hace que el rendimiento y la biomasa a cosecha tengan un buen ajuste cuando el modelo cuenta con más agua en el suelo, tal vez este problema se acentúe más en girasol por la profundidad que alcanza su raíz principal, y el cultivo haga un uso mayor de esa agua disponible; también recordar que en CropSyst el crecimiento del cultivo es calculado como el mínimo del crecimiento limitado por agua y el mínimo de crecimiento limitado por radiación. En lo que respecta al contenido de agua hasta 30 cm, en estos casos el programa produjo una subestimación leve de los valores, producto del mayor contenido de agua en el suelo, pero su acuerdo sigue siendo aceptable. En la calibración el cultivar A 6411 tenía mejor ajuste en la absorción de nitrógeno y agua a más de 30 cm, aquí en todos los casos DM 5.1 i fue mejor simulado, 7% en promedio.

4.5.3 Validación potrero 27

Con datos de tres años consecutivos de siembra de la variedad A 6411 en otra zona de la misma estación experimental, se validó el rendimiento, la biomasa a cosecha, y el índice de cosecha.

Cuadro No. 12: Resultados del ajuste de la validación del rendimiento, biomasa a cosecha, e índice de cosecha, en soja. Promedio de puntos de muestreo de tres años.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME (kg/ha)	RCME (%)	Media Observada	Media Simulada
A 6411	Rendimiento	9	442	12	3626	3593
	Biomasa Cosecha	9	945	11	8900	8554
	I. C	9	0,04	10	0,41	0,42

El ajuste del programa para la variable rendimiento en este cultivar sigue siendo bueno, también en la biomasa a cosecha, que si bien se había logrado una buena calibración, RCME (%) 15, no se había podido validar por la ausencia de datos. Al lograr una buena performance del programa simulando estas variables, es esperable que el índice de cosecha obtenga un ajuste similar, al ser un cociente de las mismas. Los valores observados y simulados por el programa de los diferentes puntos de muestreo, en las distintas variables, se presentan a continuación.

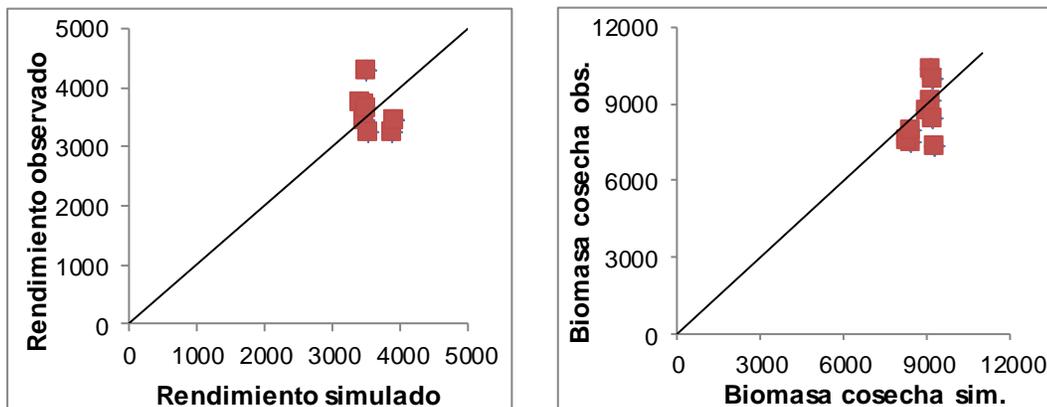
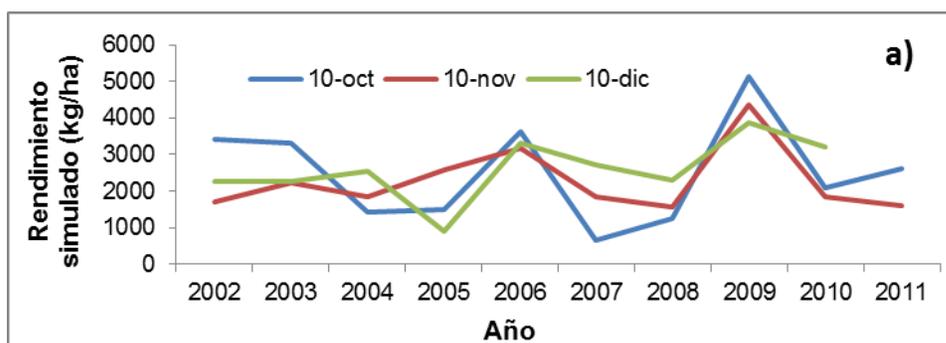


Figura No. 17: Lineal 1:1 para rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha), en soja. Cultivar A 6411.

4.6 CONTRASTE DE FECHAS DE SIEMBRA

Con los cultivares de soja validados, se corrió el modelo para un período de 10 años (2002-2011), simulando en ellos los rendimientos de ambos cultivares en régimen de cultivo continuo, y variando en cada año la fecha de siembra. Tres fechas de siembra fueron utilizadas: 10 de octubre, 10 de noviembre, y 10 de diciembre, sobre suelos de 1 m y 0,5 m de profundidad. Los gráficos a continuación ilustran la totalidad de rendimientos obtenidos desde el programa.



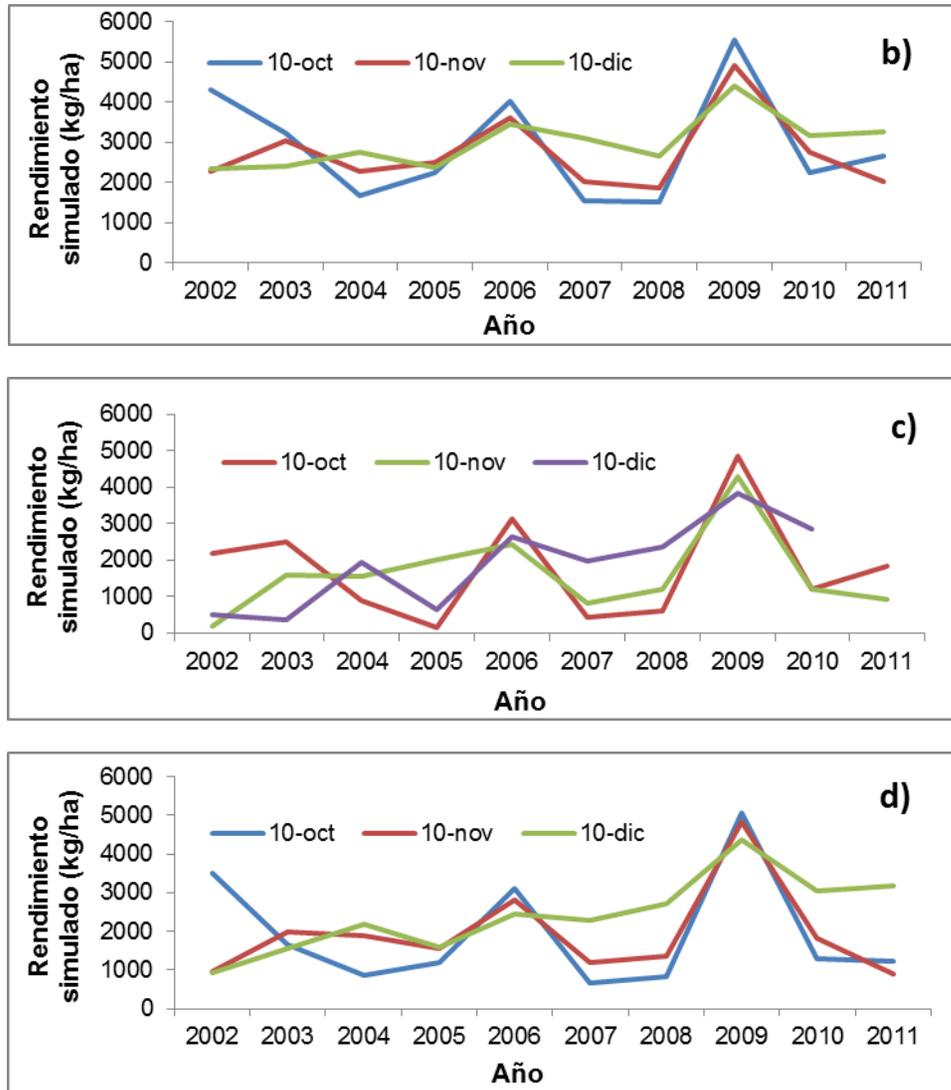
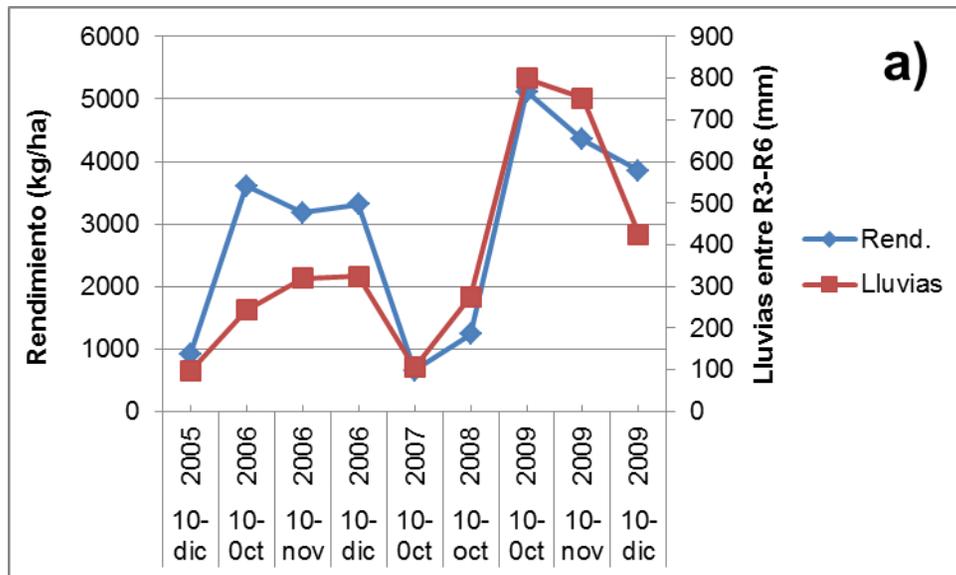


Figura No. 18: Rendimiento simulado en 10 años consecutivos de siembra para tres fechas de siembra diferente sobre suelos de 1 m, cultivar A 6411 (a), y DM 5.1 i (b); y sobre suelos de 0.5 m, cultivar A 6411 (c), y DM 5.1 i (d).

En su tesis de grado Bidegain (2012), cuantificó la respuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. En base a datos obtenidos en la estación experimental Mario A. Cassinoni, sobre suelos de igual capacidad de almacenaje de agua disponible que los de este trabajo -clasificados como de baja (entre 40 y 80 mm) y media (entre 80 y 120 mm) capacidad de almacenaje de agua disponible- conformó una base de datos con 74 situaciones de cultivo. Los rendimientos reales variaron entre 5900 y 821 kg ha⁻¹ con un promedio de

3121 kg ha⁻¹. Los rendimientos potenciales estimados variaron entre 8329 y 4138 kg ha⁻¹, con un promedio de 6164 kg ha⁻¹. Los rendimientos reales fueron menores a los potenciales, aún en las mejores condiciones hídricas, diferencia dada por la radiación interceptada. Los resultados fueron coincidentes en que el agua en el período R3-R6 es la principal determinante del rendimiento. Para la obtención de altos rendimientos –obteniendo el autor los rendimientos potenciales usando CropSyst con los coeficientes genéticos obtenidos por Baroffio y Ramos (2009)- señala que debe haber alta ocurrencias de precipitaciones, mayores a 290 mm, y un % de agua disponible mayor al 60% en dicho período.

En base a esa información, de los escenarios presentados se seleccionaron rendimientos “extremos”, y se cuantificaron las precipitaciones durante dicho período, así, previo a concluir, darle un soporte mayor al trabajo según esta información. Las Figuras No. 19 y 20 presentan los rendimientos seleccionados en los 10 años de simulación junto con las precipitaciones registradas durante el período R3-R6.



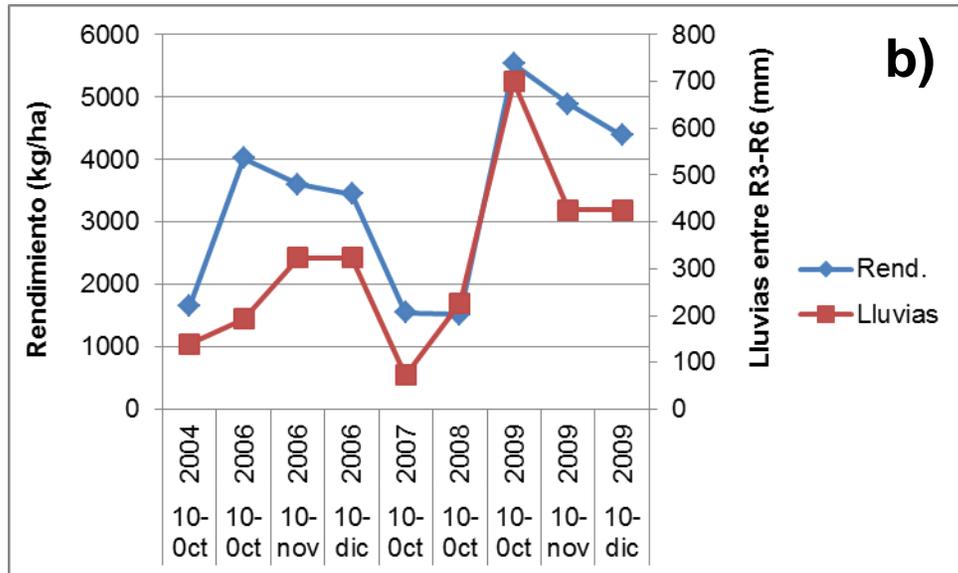


Figura No. 19: Rendimientos obtenidos y lluvias acumuladas en el período R3-R6 en años con rendimientos extremos del total de años simulados sobre suelos de 1m de profundidad. a) Cultivar A6411 y b) DM 5.1 i.

Cuando llovieron más de 300 mm en el período considerado, en todos los casos se obtuvieron rendimientos mayores a los 3000 kg/ha (4167 kg/ha en promedio vs. 4473 kg/ha Bidegain (2012)). Cuando se estuvo por debajo de esa cantidad, el 20% de los datos seleccionados presentaron rendimientos mayores a los 3000 kg/ha (1895 kg/ha en promedio). El coeficiente de regresión para el total de datos analizados es de 0,65, siendo menos estrecha la relación de estas variables que en suelos de menor profundidad, como veremos a continuación.

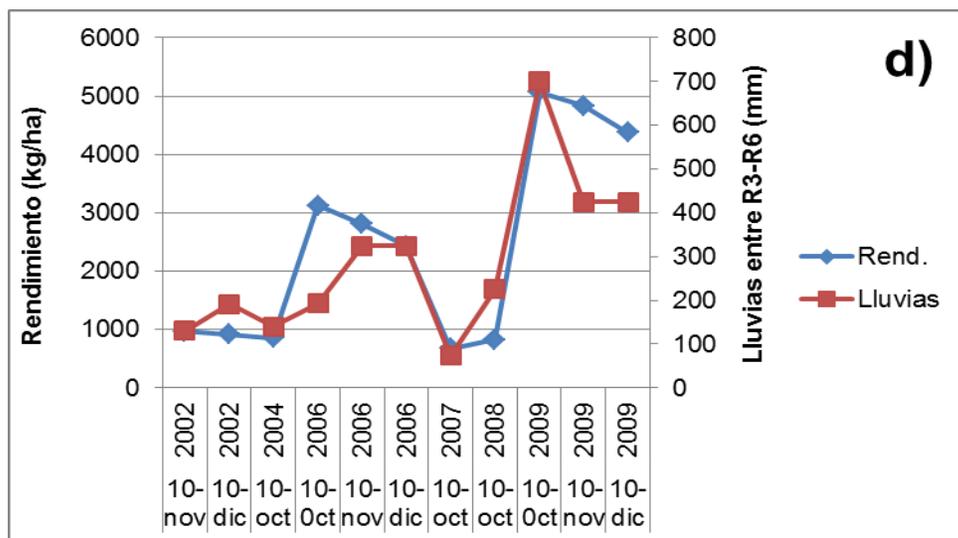
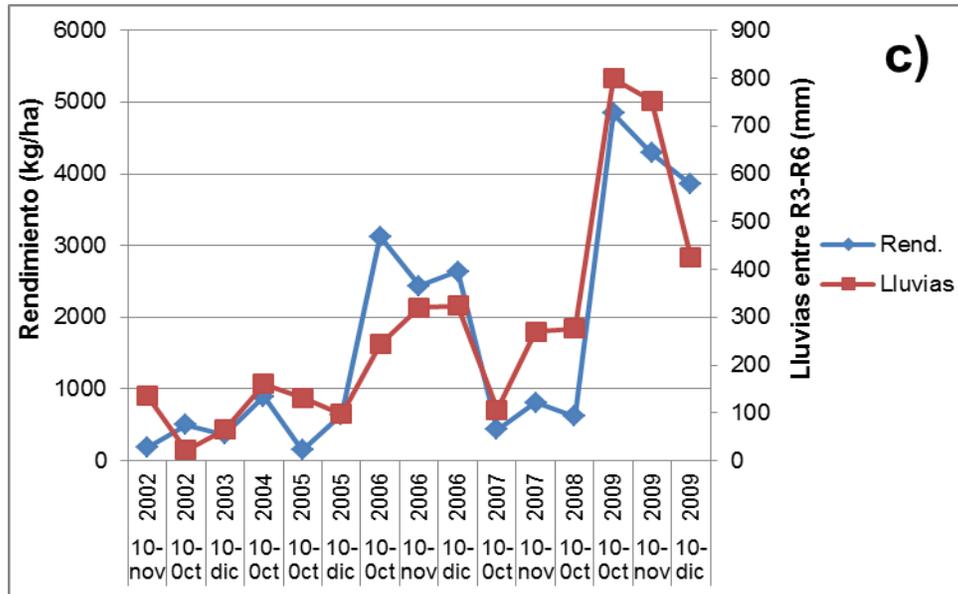


Figura No. 20: Rendimientos obtenidos y lluvias acumuladas en el período R3-R6 en años con rendimientos extremos sobre suelos de 0.5m de profundidad. a) Cultivar A6411 y b) DM 5.1 i.

En este caso vemos que con 300mm en el período considerado un 40% de los rendimientos no superaron los 3000 kg/ha, pero de todas formas fueron altos (3757 kg/ha en promedio), y no contradice lo anteriormente expuesto. Por debajo de ese registro los rendimientos en promedio fueron de 942 kg/ha. Bidegain (2012), hacía hincapié en que durante ese período también era necesario un 60% de agua disponible de los suelos, y en menor importancia las precipitaciones ocurridas desde la siembra a R3 para la obtención de altos

rendimientos, que no se consideró en este caso. En este tipo de suelos, de menor capacidad de almacenaje, el coeficiente de regresión obtenido fue de 0,74, existiendo una relación más estrecha entre ambas variables, lo que supone cierta versatilidad en los rendimientos cuando los suelos son más profundos y son capaces de almacenar más agua.

A continuación, con la variación de los rendimientos en cada fecha y tipo de suelo para el total de años analizados con CropSyst, se construyeron gráficos que muestran las probabilidades de obtener un rendimiento determinado según la fecha de siembra que elijamos y la profundidad de nuestros suelos.

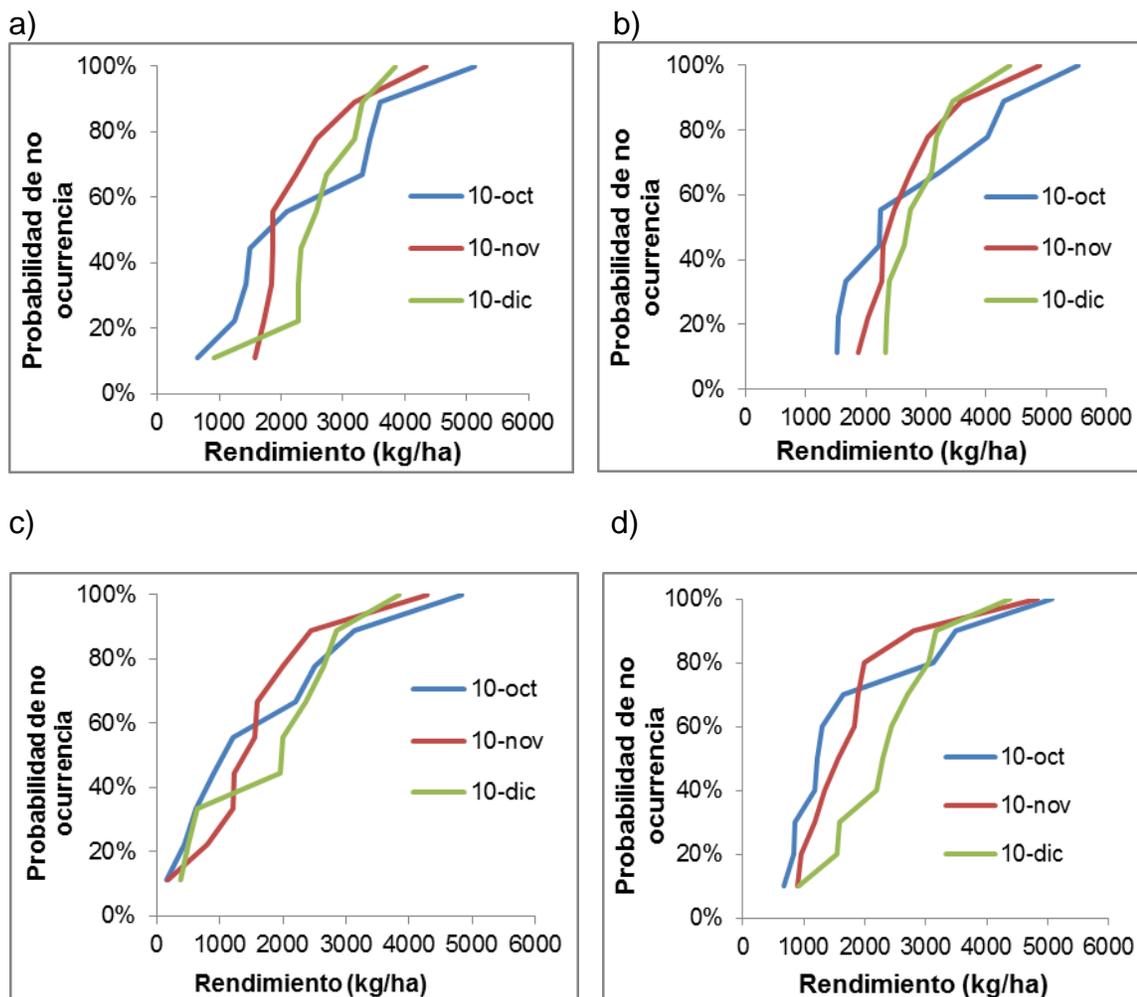


Figura No. 21: Probabilidades de no ocurrencia de rendimiento según fecha de siembra sobre suelos de 1 m de profundidad, cultivar A 6411 (a), y DM 5.1 i (b); y sobre suelos de 0.5 m, cultivar A 6411 (c), y DM 5.1 i (d).

De estos gráficos se desprenden múltiples lecturas, algunas de ellas:

- A medida que los rendimientos son mayores, las probabilidades de no ocurrencia aumentan en todos los casos.

- Los rendimientos en que las funciones se hacen “asintóticas” al eje de las ordenadas son mayores a medida que la época de siembra es más temprana.

- En los suelos de mayor profundidad los rendimientos en que se establece el 100% de probabilidad de ocurrencia son mayores que en los suelos de menor profundidad.

- Los rendimientos en que se establece el 50% de probabilidad de ocurrencia son en promedio más altos y con menor variación en los suelos de mayor profundidad. En suelos de menor profundidad, en promedio, esos rendimientos son menores y presentan mayor variación.

- Indistintamente del suelo y la fecha de siembra, los rendimientos con mayor probabilidad de ocurrir son mayores en el cultivar DM 5.1 i que en el cultivar A 6411.

- En suelos de 1 m de profundidad, ante la decisión de no querer obtener rendimientos menores a los 2000 Kg. /ha, la mejor decisión la constituiría sembrar en diciembre.

Según el enfoque de nuestro sistema de producción, vemos como puede variar la elección de determinada fecha de siembra o chacra. Este ejemplo intenta mostrar uno de los múltiples usos que el programa nos permite realizar luego de chequear que el mismo interpreta con un error aceptable los escenarios que en él ingresamos.

5. CONCLUSIONES

Soja:

- el rendimiento en grano (RCME (%) 14) y la biomasa a cosecha (RCME (%) 14) fueron simulados de forma satisfactoria, tanto en los ensayos tendientes a la calibración como a la validación del modelo de ambos cultivares.
- el contenido de agua hasta 30 cm de suelo –en general- obtuvo un acuerdo de simulación justo (RCME (%) 28). La magnitud del error de simulación fue menor a la obtenida en las variables restantes.
- el contenido de agua a más de 30 cm de suelo fue sobrestimado por CropSyst en ambos años. Los resultados de ajuste de esta variable fueron pobres (RCME (%) 56).
- las variables IAF y absorción de nitrógeno no pudieron cumplir con la metodología de calibración y validación propuesta. Problemas surgidos durante el procesamiento de datos provocaron la ausencia de los mismos en alguna de estas instancias. En las etapas en que se trabajó con cada una de ellas, ambas fueron sobrestimadas: en el IAF, este trabajo corroboró menciones de la bibliografía consultada, haciendo referencia a que en vías de una simulación satisfactoria en variables como el rendimiento en grano y biomasa a cosecha es más importante un adecuado ajuste de la intercepción de la radicación que un adecuado ajuste en este índice. El desajuste en la absorción de nitrógeno, a priori, obedecería a un error metodológico. Al no inicializar antes los escenarios en el software se estuvo degradando la materia orgánica a un mayor ritmo que la realidad, en vías de estabilizarse, por tanto es un punto que se debería tener en cuenta en futuras experiencias de trabajo con el modelo.
- aunque no fue posible lograr un ajuste satisfactorio para el conjunto de variables, este trabajo permitió la obtención de valores de coeficientes genéticos que permiten en las variables validadas el uso del modelo como herramienta de apoyo al análisis y toma de decisiones en condiciones semejantes y los cultivares estudiados. Al final de esta tesis, un ejemplo claro muestra las potencialidades de uso de este tipo de programas.

Girasol:

- a pesar de los esfuerzos de calibración no se pudo obtener, en general, un buen ajuste en las variables objeto de estudio. Problemas sanitarios, de plagas, sumados a otros problemas que puedan haber operado, determinaron que en este trabajo no se haya logrado cumplir con el objetivo planteado para este cultivo.
- la biomasa a cosecha en general no mostró un adecuado ajuste. Aún en los casos en que el rendimiento estuvo bien simulado (calibración de las épocas temprana e intermedia del cultivar DK 3940). El índice de cosecha en ambas instancias tuvo ajustes pobres, donde CropSyst mostró cierta insensibilidad a variar los valores de éste, problema también reportado en la bibliografía.
- el contenido de agua hasta 30 cm de suelo, evaluado en un año promedio y uno donde llovió el doble de la media histórica, obtuvo en ambas el mejor resultado de simulación en relación al resto de las variables evaluadas contemporáneamente.

6. RESUMEN

Los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para entender la complejidad que caracteriza los sistemas ecológicos y ambientales. Permiten realizar análisis de impactos tecnológicos, económicos y ambientales, la evaluación de estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue obtener los parámetros genéticos de dos cultivares de soja y girasol de forma que pudieran ser utilizados en el modelo de simulación CropSyst. En el departamento de Paysandú, en el litoral oeste de la República Oriental del Uruguay, durante los veranos 2009-2010 y 2010-2011, se sembraron en tres fechas de siembra los cultivos en parcelas experimentales, realizando durante su ciclo de vida diferentes mediciones necesarias para la calibración (con los datos del segundo año), y validación (datos del primer año de ensayos), del programa. La capacidad predictiva del modelo fue evaluada por medio de la comparación de resultados de las simulaciones frente a las medidas obtenidas en los experimentos de campo, a través del método lineal 1:1 y la relación de la RMSE (raíz del cuadrado medio del error). Las variables estudiadas fueron: el rendimiento en grano, la biomasa a cosecha, el índice de área foliar (IAF), la acumulación de nitrógeno y el contenido de agua en el suelo. En soja fueron simuladas con un error aceptable las variables: rendimiento en grano (RCME (%) 9,5; promedio de validación en ambos cultivares), la biomasa a cosecha (RCME (%) 14) y el contenido de agua hasta 30 cm de suelo (RCME (%) 24). No así el contenido de agua a más de 30 cm (RCME (%) 60,5), la acumulación de nitrógeno en planta y el índice de área foliar, que por diferentes motivos no lograron ajustarse de forma satisfactoria. En girasol, más allá de los esfuerzos de calibración, ninguna de estas variables pudo ser simulada eficazmente; problemas bióticos y abióticos habrían operado para que no se lograra el objetivo en este cultivo.

Palabras clave: Modelos de simulación; CropSyst; Calibración y validación; Parámetros genéticos; Soja; Girasol.

7. SUMMARY

Simulation models are essential tools to understand the environmental and ecological systems' complexity. They allow the analysis of technological, economic and environmental impacts, productive strategies assessment and forecasts yield crop. The aim of this study was obtaining genetic parameters from two cultivars of soybean and sunflower, so that they could be used in the simulation model CropSyst. In Paysandú department, on the west coast of Uruguay Republic, during 2009-2010 and 2010-2011 summer crop plots were planted in three different planting dates, performing different necessary measurements for calibration during their life cycle (with data from the second year), and validation (data from the first year of trials), of the model. The model's predictive capacity was evaluated by comparing simulation results, against measurements obtained in field experiments, through the linear method 1:1 and ratio of the RMSE (root mean square error). The variables studied were: grain yield, harvest biomass, leaf area index (LAI), nitrogen accumulation, and water in soil. On soybeans were simulated with an acceptable mistake the following variables: grain yield (RMSE (%) 9.5; validation average in both cultivars), biomass yield (RMSE (%) 14), and the water content up to 30 cm of soil (RMSE (%) 24) -but not water content of more than 30 cm (RMSE (%) 60.5) - nitrogen accumulation in plant and leaf area index; they did not adjust because of many factors, in a satisfactory way. In sunflower, beyond calibration efforts, none of these variables could be simulated effectively; biotic and abiotic problems would have operated to abort the aim in this crop.

Keywords: Simulation models; CropSyst; Calibration and validation; Genetic parameters; Soybean; Sunflower.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. ABBATE P.E.; DARDANELLI J.L.; CANTERO M.G.; MATURANO M., MELCHIORI R.J.M., SUERO E.E. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Science*. 44: 474-483.
2. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper no. 56)
3. AZAM-ALI, S.N.; CROUT, N.M.J.; BRADLEY, R.G. 1994. Perspectives in modelling resource capture by crops. *In*: University of Nottingham Eastern School on Resource Capture by Crops (52nd., 1994, Nottingham). Proceedings. Nottingham, UK, Nottingham University. pp. 125–148.
4. BAETHGEN, W.E. 1993. Aplicaciones de modelos de simulación en la investigación de manejo de suelos y cultivos. Montevideo, INIA. s.p. (Boletín de Divulgación no. 42).
5. _____; MORÓN, A.; DÍAZ-ROSELLO, R.M. 1994. Modeling long-term soil organic carbon changes in six cropping systems of SW Uruguay. *In*: World Congress of Soil Science (15th., 1994, Acapulco, Mexico). Transcriptions. Acapulco, WCSS. cap. 9, pp. 300-302.
6. _____; _____. 2000. Carbon sequestration in agricultural production systems of Uruguay; observed data and century model simulation runs. *In*: Reunión de la Red Latinoamericana de Agricultura Conservacionista (5^a., 1999, Florianópolis, Brasil). Trabajos presentados. Florianópolis, EPAGRI/ FAO. s.p
7. BAROFFIO, J. C.; RAMOS, J. P. 2009. Calibración y validación del modelo CropSyst para un cultivar de soja para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 88 p.
8. BERRUTI, N. 2009. Calibración y validación del modelo CropSyst para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay en un híbrido de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 76 p.

9. BERTI, A.; MORARI, F.;BORIN, M.; GIARDINI, L. 2001. Use of CropSyst to simulate a four year rotation with different fertilization levels. In: International Symposium Modelling Cropping Systems (2nd., 2001, Florence, Italy). Proceedings. Florence, s.e. pp. 105-106.

10. BIDEGAIN, S. A. 2012. Cuantificación de la respuesta en rendimiento en grano en el cultivo de soja en función de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, contenido de agua inicial y distribución de precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 32 p.

11. CADY, F. B. 1991. Experimental design and data management of rotation experiment. *Agronomy Journal*. 83: 50-56.

12. CARMONA, G.; LE GRUSSE, P.; MARJORIE, L. B.; BELHOUCLETTE, H.; ATTONATY, M. A. 2007. Construcción participativa de un modelo de gestión de la explotación agrícola para el apoyo a la toma de decisión colectiva. Aplicación al caso de la cuenca de Aveyron-Lère. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*. 213: 71-101.

13. CEOTTO, E.; DONATELLI, M.; CASTELLI, F.; QUARANTA, F.; RINALDI, M.; SPALLACCI, P. 1993. IL modello EPIC nella simulazione di sistemi colturali attuati in ambienti italiani; IL. Validaciones rispetto ai dati produttivi. *Agricoltura Ricerca*. 151/152: 209-228.

14. _____.; _____.; SPALLACCI, P. 1994. CropSyst validation for soil content of water and nitrate at two locations of Northern Italy. In: ESA Congress (3rd., 1994, Abano-Padova). Proceedings. Abano-Padova, s.e. pp. 334-335.

15. DALLA MARTA, A.; MANCINI, M.; FERRISE, R.; BINDI, M.; ORLANDINI, S. 2010. Energy crops for biofuel production; analysis of the potential in Tuscany. *Biomass and Bioenergy*. 34: 1041–1052.

16. DI BARI, V.; RIZZO, V. 1981. The introduction of maize cropping to the Apulian 'Tavoliere'. In: Seminaire Agrimed (1980, Toulouse, France). Proceedings. Toulouse, s.e. s.p

17. _____.; _____.; RINALDI, M.; MAIORANA, M.; DE GIORGIO, D.; VONELLA, A.V. 1992. Introduction of soybean and sorghum as a catch-crop in continuous cropping of durum wheat. In: ESA

Congress (2nd., 1992, Warwick). Proceedings. Warwick, UK, Warwick University. pp. 352-353.

18. DONATELLI M.; STOCKLE, C.; RINALDI, M. 1997. Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy. *European Journal of Agronomy*. 6: 35-45
19. D'OTTONE, F. 2010. Calibración y validación de CropSyst para un cultivar de trigo para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 49 p.
20. GARCIA DE CORTAZAR, V. 2003. Simulación de la dinámica de los rastrojos sobre el suelo en cero labranza. (en línea). Santiago de Chile, s.e. 12 p. Consultado 13 mar. 2013. Disponible en <http://www.sipeaa.it/tools/CropSyst/VGdeC1.pdf>
21. HERNÁNDEZ, N.; SOTO, F.; CABALLERO, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos; características y usos. (en línea). *Cultivos Tropicales*. 30 (1): 73-82. Consultado 20 nov. 2011. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362009000100014&lng=es&nrm=iso
22. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA (INIA); INSTITUTO NACIONAL DE SEMILLAS (INASE). 2005. Evaluación de cultivares de soja evaluados en la zafra 2004/2005. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 may. 2012. Disponible en http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/resultados/soja/soja04.htm
23. _____.; _____. 2009. Evaluación de cultivares de soja evaluados en la zafra 2008/2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 may. 2012. Disponible en http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/resultados/soja/soja08.htm
24. _____.; _____. 2010. Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de girasol período 2009. (en línea). Montevideo. 40 p. Consultado 20 may. 2012. Disponible en http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/PubGirasolPeriodo2009.pdf

25. JAMIESON, P.D.; PORTER, J. R.; WILSON, D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT on wheat crops Brown in New Zealand. *Field Crop Research*. 27: 337-350.
26. JONES, J. W.; RITCHIE, J. T. 1990. Modelos de crecimiento del cultivo. In: Hoffman, G. J.; Howell, T. A.; Salomón, K. H. eds. Manejo de sistemas de riego agrícola. San José, ASAE. pp. 63-89 (Monografías ASAE)
27. MORON, A. 2009. Estimaciones del impacto de la agricultura y la ganadería en el suelo del Uruguay. In: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo (2009, Montevideo, Uruguay). Impactos y propuestas; resúmenes expandidos. Montevideo, INIA. pp. 17-21 (Actividades de Difusión no. 587).
28. MUNANG, T.; RIVINGTON, M.; BELLOCCHI, G.; COLLS, J. 2008. Crop yield model validation for Cameroon. *Theoretical and Applied Climatology*. 96: 275–280.
29. PALA, M.; STÖCKLE, C.O.; HARRIS, HC. 1996. Simulación de trigo duro (*Triticum turgidum* spp. durum) el crecimiento bajo el agua y los diferentes regímenes de nitrógeno en un ambiente mediterráneo con CropSyst. *Agricultural Systems*. 51:147-163.
30. PRIESTLEY, C.H.B.; R.J. TAYLOR. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation large scale parameters. *Monthly Weather Review*. 100: 81–82.
31. RINALDI, M.; VENTRELLA, D. 1997. Uso dei modelli EPIC e CROPSYST in sistemi colturali del Sud Italia. *Agricoltura Ricerca*. 171: 47-58.
32. RIZZO, V.; DI BARI, V.; MAIORANA, M.; CONVERTINI, G.; RINALDI, M.; DE GIORGIO, D. 1990. Effects of the previous crop and continuous cropping on the production of durum wheat and on some chemical characteristics of soil. In: Congress of the European Society of Agronomy (1st., 1990, Paris). Proceedings. Paris, s.e. pp. 20-21.
33. RODER, W.; MASON, S.C.; CLEGG, M.D.; KNIEP, K.R. 1989. Yield-soil water relationship in sorghum-soybean cropping systems with different fertilizer regimes. *Agronomy Journal*. 81: 470-475.

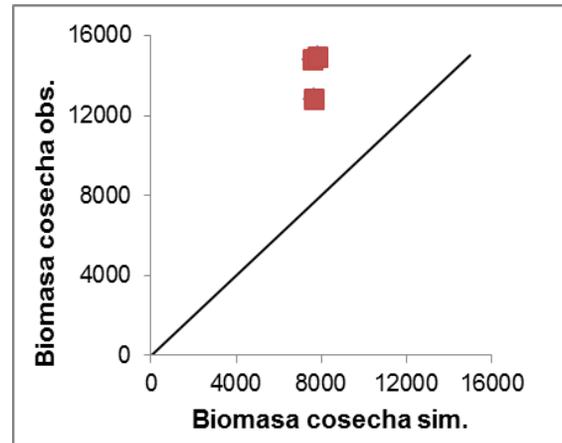
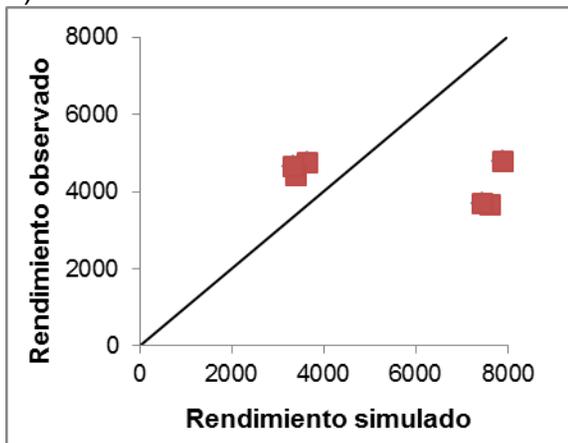
34. ROMERO, R. 1995. Vulnerabilidad y adaptación de la cebada cervecera al cambio climático en el Uruguay. (en línea). Colonia, INIA. 13 p. Consultado 11 may. 2012. Disponible en http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/va_cebada_uruguay.pdf
35. SAWCHIK, J. 1995. Vulnerabilidad y adaptación del maíz al cambio climático en el Uruguay. (en línea). Montevideo, INIA. 10 p. Consultado 11 may. 2012. Disponible en http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/ambiente/va_maiz_uruguay.pdf
36. SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society of America Journal. 70: 1569-1578.
37. SINCLAIR, T. R. 1998. Limits on land, water, energy and biological resources; comment. In: Plants and Population; Is There Time? Limits to Crop Yield (1998, Irvine). Colloquium. Irvine, California, National Academy of Science. s.p
38. STÖCKLE, C.O.; R.L. NELSON. 2000. Cropsyst user's manual (v. 3.0). (en línea). Pullman, Washington State University. Biological Systems Engineering Department. 235 p. Consultado 11 may. 2012. Disponible en http://www.sipeaa.it/tools/CropSyst/CropSyst_manual.pdf
39. _____; DONATELLI, M.; NELSON, R. 2003. CropSyst, a cropping system simulation model. European Journal of Agronomy. 18: 289-307.
40. TODOROVIC, M.; ROSELLA, A.; LJUBOMIR, Z.; MERIE-THERESE A. S.; STOCKLE, C.; PASQUALE, S. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. European Journal of Agronomy. 101: 509–521.
41. URUGUAY. MAP. DSF. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1:1000000.
42. VENTRELLA, D.; RINALDI, M. 1999. Comparison between two simulation models to evaluate cropping systems in Southern Italy. Agricultural Medicine. 129: 99-110.

10. ANEXOS

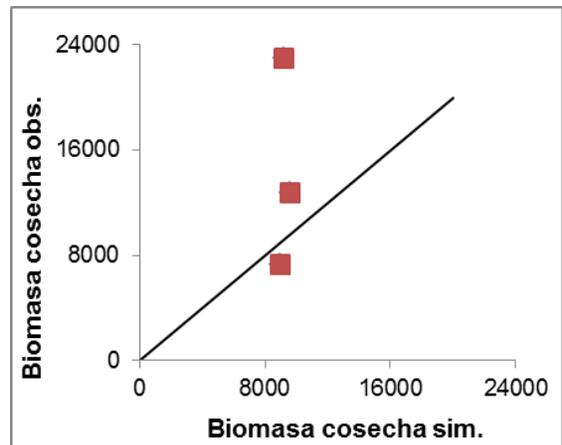
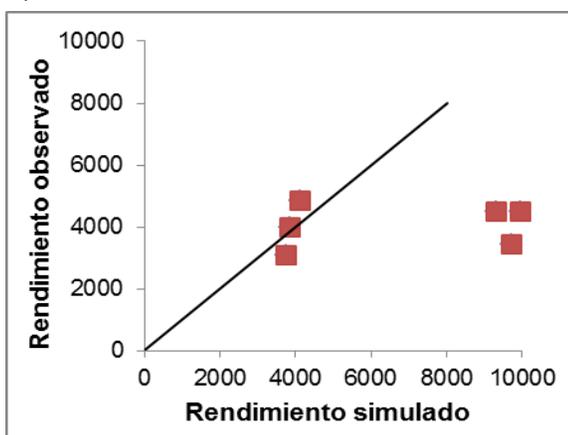
Anexo No. 1: Resultados del ajuste de la validación del rendimiento y biomasa a cosecha en girasol. Promedio de puntos de muestreo y fechas de siembra.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME (kg/ha)	RCME (%)	Media Obs. (kg/ha)	Media Sim. (kg/ha)
MG 52	Rendimiento	6	2689	62	4322	5558
DK 3940		6	3940	97	4059	6783
MG 52	Biomasa	3	14204	100	14171	7709
DK 3940	Cosecha	3	15755	110	14347	9283

a)



b)

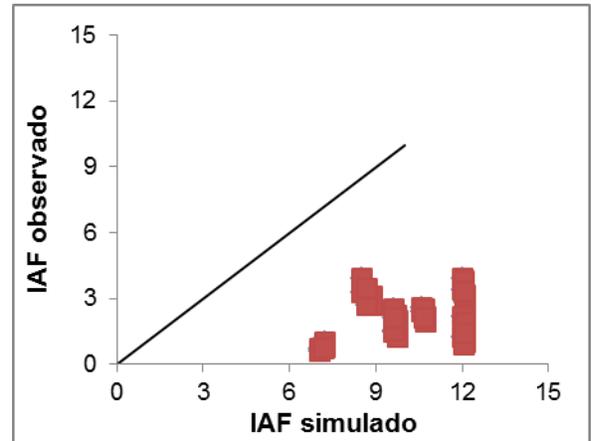
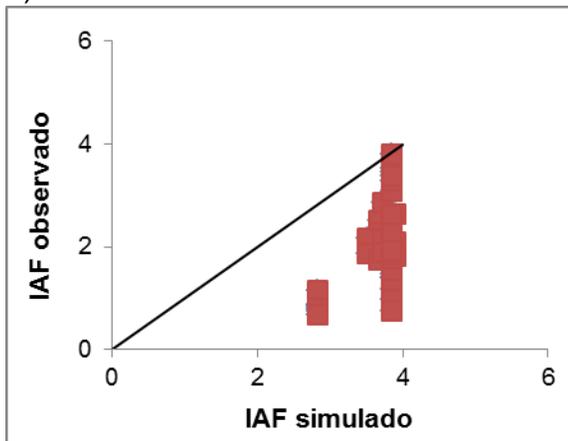


Anexo No. 2: Lineal 1:1 para la validación del rendimiento (izquierda), y biomasa a cosecha (derecha), en girasol. Cultivar MG 52 (a), y DK 3940 (b).

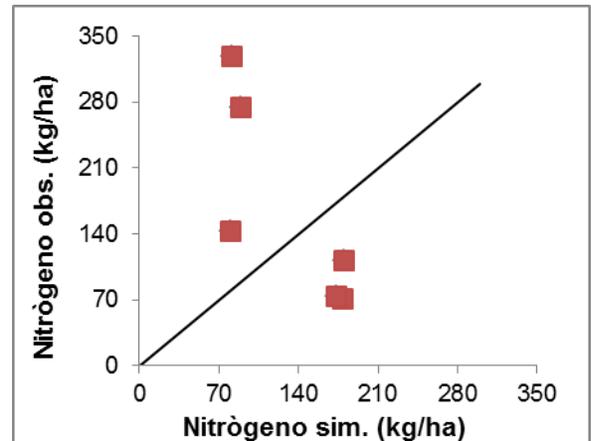
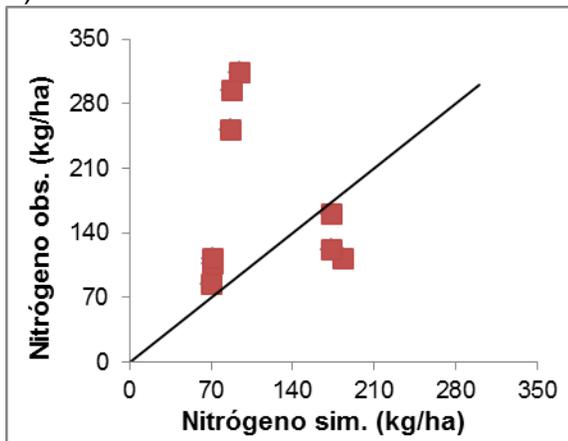
Anexo No. 3: Resultados del ajuste de la validación del IAF, absorción de nitrógeno, contenido de agua hasta 30 cm, y a más de 30 cm, en girasol. Promedio de puntos de muestreo y fechas de siembra.

Cultivar	Variable	No. Obs.	RCME	RCME (%)	Media Obs.	Media Sim.
MG 52	IAF (m ²)	42	2	89	2	4
DK 3940		42	8	381	2	10
MG 52	Nitrógeno (kg/ha)	9	119	69	173	113
DK 3940		6	145	87	167	131
MG 52	Agua hasta 30 cm (mm)	14	41	34	123	86
DK 3940		14	48	37	131	88
MG 52	Agua 30 cm a más (mm)	15	76	47	160	233
DK 3940		15	78	49	160	235

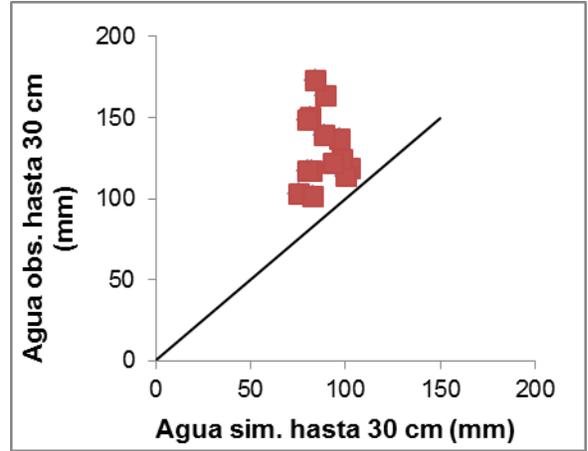
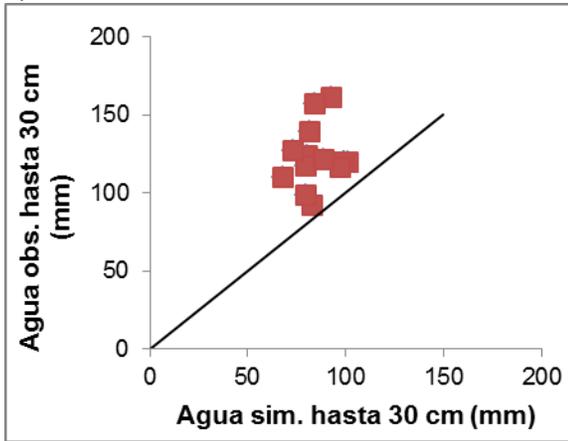
a)



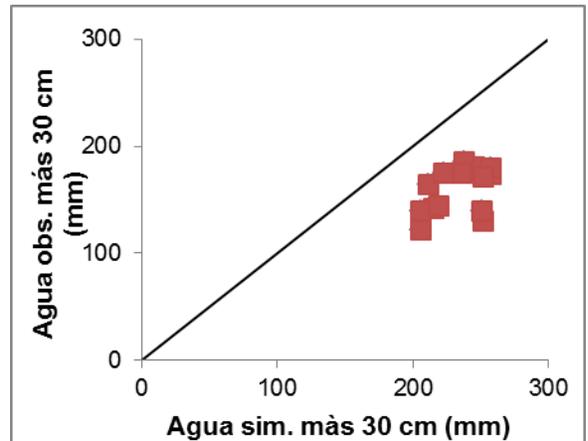
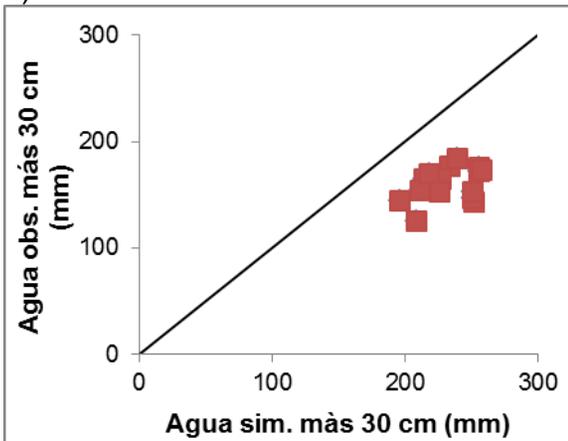
b)



c)



d)



Anexo No. 4: Lineal 1:1 de la validación del índice de área foliar (IAF) (a), absorción de nitrógeno (b), contenido de agua hasta 30 cm (c), y a más de 30 cm (d), en diferentes estadios fonológicos y diferentes fechas de siembra. Cultivar MG 52 (izquierda) y DK 3940 (derecha).