

**“CALIBRACIÓN DEL MODELO CROPSYST PARA SIMULAR
EL BALANCE HÍDRICO EN CULTIVOS INVERNALES DEL CENTRO -
OESTE DE ENTRE RÍOS”**

Emmanuel Blanzaco

Ingeniero Agrónomo

Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Concepción del Uruguay, 2006

Especialización en Cultivos de Granos

Escuela para Graduados Alberto Soriano

Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

Tutor:

Octavio Pedro Caviglia

Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Entre Ríos, 1996.

Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, 2005.

Autor:

Emmanuel Blanzaco

Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción del Uruguay, 2006.

JURADO

Federico Esteban Bert

Ingeniero Agrónomo. Universidad de Buenos Aires.

Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad de Buenos Aires.

Diego de Abelleira

Ingeniero Agrónomo. Universidad de Buenos Aires.

Magister Producción vegetal, Universidad de Buenos Aires.

Fecha de defensa del trabajo: 14 de Agosto de 2012

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a mi Director de tesina, Ing. Agr. Dr. Octavio P. Caviglia por su extraordinario apoyo, por compartir generosamente sus conocimientos y experiencia y por sus contribuciones en la elaboración del presente trabajo. En este orden de ideas y en igual sentido, hago extensivo mi reconocimiento al Ing. Agr. Horacio Videla.

A los Ing. Agr. Dres. Daniel J. Miralles y Betina C. Kruk, quienes en su carácter de docentes responsables del seguimiento de las tesinas de los alumnos del curso de posgrado, Especialización en Cultivos de Granos (UBA), garantizaron un ida y vuelta en el proceso de elaboración absolutamente enriquecedor, como así mismo el proceso y el producto generado y compartido en la dinámica de grupos integrados por colegas que participaron en el curso.

Mi agradecimiento al Jefe Sección Campo Experimental Suelos Sr. Cappellacci Héctor y su personal auxiliar técnico de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA por la desinteresada e incondicional asistencia que me brindaron.

A todos ellos, muchas gracias.

Paraná, 14 Agosto de 2012

INDICE GENERAL

Índice de Tablas	VII
Índice de Figuras	VIII
Resumen	1
1. Introducción	3
2. Materiales y Métodos	7
2.1 Características de la zona de estudio	7
2.2 Sitio experimental	8
2.3 Experimento realizado	9
2.4 Condiciones meteorológicas del experimento	10
2.5 Parámetros evaluados	12
2.5.1 Estados fenológicos	12
2.5.2 Humedad del suelo	13
2.5.3 Radiación interceptada por el cultivo	14
2.5.4 Biomasa	14
2.5.5 Índice de área foliar (IAF)	15
2.5.6 Área foliar específica (SLA).	15
2.5.7 Rendimiento	15
2.6 Descripción del modelo	15
2.7 Calibración y optimización de parámetros	27
2.8 Evaluación del modelo	33
2.9 Validación del agua en el suelo	34
3 Análisis de sensibilidad	34
3. Resultados	35
3.1 Variables de crecimiento y desarrollo	35
3.2 Simulación de agua en el suelo	39
3.3 Análisis de sensibilidad	46
4. Discusión	47

5. Conclusiones**52****6. Bibliografía****53**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Producción (tn) de los principales cultivos Dpto. Paraná	9
Tabla 2: Análisis de suelo realizado previo a la siembra	10
Tabla 3: Parámetros obtenidos por default	28
Tabla 4: Parámetros obtenidos por optimización	29
Tabla 5: Parámetros obtenidos del experimento a campo	30
Tabla 6: Análisis de sensibilidad para el trigo ciclo largo	47
Tabla 5: Parámetros de “e” y “k” comparados con otros trabajos	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Temperaturas medias mensuales	11
Figura 2: Precipitaciones mensual, normal (1934-2007) y balance	12
Figura 3: Esquema de método de cascada	18
Figura 4: Esquema del método de las diferencias finitas	19
Figura 5: Diagrama cálculo crecimiento CropSyst	22
Figura 6: Máxima eficiencia del uso de radiación	31
Figura 7: Coeficiente de transpiración	32
Figura 8: Comparación de materia seca simulada y observada	36
Figura 9: Intercepción de la radiación simulada y observada	37
Figura 10: Gráfico 1:1 rendimiento simulado y observado	38
Figura 11: Contenido de agua volumétrica en trigo ciclo largo	40
Figura 12: Contenido de agua volumétrica en trigo ciclo corto	40
Figura 13: Contenido de agua volumétrica en lino	41
Figura 14: Contenido de agua volumétrica en colza	41
Figura 15: Contenido de agua volumétrica en arveja proteica	42
Figura 16: Contenido de agua total en trigo ciclo largo	43
Figura 17: Contenido de agua total en trigo ciclo corto	43
Figura 18: Contenido de agua total en lino	44
Figura 19: Contenido de agua total en colza	44
Figura 20: Contenido de agua total en arveja proteica	45
Figura 21: Gráfico 1:1 agua total a 50 cm profundidad simulada y observada	45
Figura 22: Constantes hídricas a 50 cm profundidad simulada y observada	50

DECLARACIÓN

“Declaro que el material incluido en este trabajo no lo he presentado, en forma parcial o total en ésta u otra institución.”

RESUMEN

El trabajo tiene por objetivo calibrar el modelo CropSyst para simular la producción de materia seca y el balance hídrico de los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) ciclo largo y ciclo corto, colza (*Brassica napus*), lino (*Linum usitatissimum*) y arveja proteica (*Pisum sativum*) en el centro oeste de Entre Ríos. Adicionalmente, se incluyó un análisis de sensibilidad de parámetros que podrían tener, *a priori*, un mayor impacto sobre el crecimiento y desarrollo y en especial sobre el balance hídrico. La optimización de Cropsyst se realizó utilizando datos obtenidos de un experimento a campo, realizado con un diseño en bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Los parámetros medidos fueron: fenología, humedad del suelo, radiación interceptada por el cultivo, biomasa, índice de área foliar, área foliar específica y rendimiento. Durante el proceso de calibración se utilizó un procedimiento iterativo para optimizar las salidas de crecimiento y desarrollo de los cultivos. Una vez optimizado el modelo agronómico se procedió a evaluar las predicciones relacionadas con el contenido de agua ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$) por capas y la lámina de agua total (mm) hasta una profundidad de 50 cm. En relación con el contenido de agua se tomaron dos fechas aproximadas de observación y registro, seleccionadas en base al período crítico de cada especie y la lámina de agua total se evaluó durante todo el ciclo de los cultivos. A los efectos de simular la infiltración de agua en el suelo se usaron dos métodos incluidos en modelo: el método en cascada y el método de las diferencias finitas. En general, Cropsyst brindó estimaciones razonables en cuanto a la biomasa, interceptación de radiación y rendimiento. Las predicciones del contenido de agua en el suelo para cada profundidad resultaron poco satisfactorias. Sin embargo, cuando se consideró la lámina de agua a 50 cm las predicciones fueron más aceptables. Con relación al análisis de sensibilidad, los parámetros evaluados no mostraron cambios significativos en la simulación del agua en el suelo ni en el resto de los indicadores analizados, sugiriendo que mejores ajustes en la predicción del contenido de agua deberían lograrse seleccionando otro tipo de parámetros.

La revisión y adaptación de las funciones de pedo-transferencia para estimar los límites máximos y mínimos de almacenaje de agua en el suelo probablemente mejore los resultados obtenidos en este trabajo.

1. Introducción.

La actual producción agrícola en la Provincia de Entre Ríos muestra una alta tendencia al monocultivo de la soja (*Glycine max* L.). Así lo demuestra el informe de la campaña de soja 2006/07 donde se sembraron 1.285.000 hectáreas representando el 65% de los cultivos agrícolas (SIBER, 2006). Esta situación compromete, a futuro, la sustentabilidad del sistema.

La inclusión de cultivos de invierno en las secuencias de cultivos permitiría optimizar la utilización de recursos disponibles como lo son el agua y la luz solar. Además, esto tendría un alto impacto en la conservación del suelo y en la producción de granos. Esta estrategia resultaría en un mejor aprovechamiento de los recursos, y mejoraría la productividad de la secuencia (Caviglia *et al.*, 2004). Por lo general el cultivo tradicional de invierno es el trigo (*Triticum aestivum* L.).

El cultivo de trigo en Entre Ríos se realiza con una baja intensidad en el uso de insumos debido, en parte, al alto riesgo de ocurrencia de epifitias de fusariosis de la espiga y al hecho de que los rendimientos obtenidos en la región están por debajo de las zonas óptimas para su cultivo, lo que desalienta su siembra por parte de los productores. Por ello, se plantea la inclusión de cultivos de invierno alternativos al trigo como lo son la colza (*Brassica napus*), el lino (*Linum usitatissimum*) y la arveja proteica (*Pisum sativum*), que confieran a la secuencia mayor estabilidad en los rendimientos. Lamentablemente, la adopción de estos cultivos se encuentra seriamente limitada por la falta de canales adecuados de comercialización. Actualmente se está comenzando a difundir el cultivo de colza en algunas zonas, así como en otras aún se mantiene la tradición de cultivar lino, el que ha demostrado tener rendimientos bajos pero poco variables entre años (Caviglia, 2007).

La evaluación a largo plazo de los beneficios económicos y ambientales de la inclusión de estos cultivos en las secuencias puede lograrse a través de ensayos a campo convencionales o mediante el uso de modelos de simulación agronómica.

Es ampliamente conocido que los modelos de simulación agronómicos tienen un uso potencial en lo referente a: toma de decisiones del manejo del cultivo; prácticas culturales; fertilización; riego; uso de agroquímicos; predicción de la erosión del suelo y efectos del cambio climático. Además, son utilizados para ayudar a dar respuesta a las hipótesis formuladas en los trabajos de investigación, su interacción con otras disciplinas y la organización de los datos (Boote *et al.*, 1996).

El uso de modelos para evaluar la inclusión de cultivos de invierno en la secuencia de cultivos es, en general, muy escasa tanto a nivel local como internacional. Por lo tanto, para cumplir con la premisa planteada se hace necesario disponer de modelos calibrados y validados.

CropSyst es un modelo de simulación del crecimiento y desarrollo realizado en la Universidad del Estado de Washington (Pullman, USA) para predecir el comportamiento de cultivos agrícolas en secuencia (Stöckle y Nelson, 1998 y 2003). La principal ventaja que presenta el modelo, consiste en que utiliza cultivos genéricos sin necesidad de ajustar los componentes genéticos. El modelo simula el desarrollo y crecimiento de la planta, el balance hídrico del suelo, el balance de nitrógeno del suelo-planta, la acumulación de materia seca (biomasa y rendimiento), la producción de residuos y su descomposición y la erosión hídrica. Además, realiza un análisis del rendimiento y del impacto ambiental de las secuencias de cultivos y su gestión.

El modelo CropSyst es apropiado para abordar algunas de las cuestiones antes mencionadas ya que, como un modelo genérico, permite la rápida incorporación de una amplia gama de especies, tales como: maíz (*Zea mays*), trigo, cebada (*Hordeum vulgare*), soja, colza, lino, arveja y sorgo (*Sorghum bicolor*). Por lo tanto, seleccionando el o los cultivos por defecto se generan uno o más proyectos. Cada proyecto seleccionado contiene una serie de parámetros, entendiendo como tales: la clasificación del cultivo (uso, ciclo, órgano cosechado, etc.), transpiración, fenología, fotoperíodo, vernalización, cosecha, raíces, crecimiento de canopia, rastrojo, entre otros.

Ha sido probado y usado satisfactoriamente (Stöckle *et al.*, 1997; Stöckle and Jara, 1998; Pala *et al.*, 1996) en EE.UU., en la región del Mediterráneo en el continente Europeo y en el Medio Oriente, en lo que respecta a las respuestas al agua y al nitrógeno. El modelo ha sido desarrollado para servir como una herramienta analítica en el estudio de los efectos del manejo de los sistemas de cultivos en la productividad y el ambiente. Asimismo, este modelo se ha combinado con experimentos a campo con el fin de estudiar la alternativa de utilizar una secuencia de cultivos intensiva-flexible basada en la oportunidad de combinación de cultivos, incluyendo trigo, colza y legumbres y el ajuste de la dosis de N a las condiciones de crecimiento (Sadras y Roget, 2004). También CropSyst se ha utilizado para analizar riesgo de drenaje profundo asociado con distintas prácticas de manejo agronómico, estimando el balance de agua a partir de datos de series climáticas históricas (Díaz –Ambrona *et al.*, 2005).

Otros investigadores han encontrado buenas predicciones utilizando el modelo de simulación CERES-Maíz del entorno DSSAT v3.5 (Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia Agro tecnológica, por sus siglas en inglés) (Bert *et al.*, 2007). En ese trabajo se evaluaron un conjunto de parámetros relacionados con las propiedades del suelo y la radiación solar diaria, en el cultivo de maíz, en la Región Pampeana Argentina. El análisis de sensibilidad realizado para evaluar los cambios en las salidas del modelo modificando las variables de entrada mencionadas arrojó como resultado una mayor sensibilidad a los cambios en la radiación solar que para las variables de suelo.

Otro de los modelos agronómicos utilizados para la toma de decisiones en la Región Pampeana Argentina fue CROPGRO-Soja (Mercau *et al.*, 2007), sobre el que se evaluaron sus predicciones en cuanto a la dinámica de agua en el suelo y la producción de biomasa, bajo diferentes condiciones ambientales.

En los cultivos de secano el agua es un factor clave, por ello, el punto central en orden a la mayor eficiencia del uso del agua es el correcto manejo agronómico que optimice el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Por tanto, un panorama integral de la problemática en estudio está dado por la necesidad de comprender y estimar el balance hídrico. Dicho balance posibilitará diseñar una óptima rotación de cultivos que garantice una producción sustentable.

El objetivo del presente estudio fue calibrar el modelo CropSyst para simular la producción de materia seca y el balance hídrico de los cultivos de trigo, colza, lino y arveja proteica en el centro oeste de Entre Ríos. Asimismo, se propone realizar un análisis de sensibilidad para verificar la incidencia de parámetros incluidos en el modelo CropSyst sobre las variables más importantes, en especial las relacionadas con el balance hídrico.

2. Materiales y Métodos

Para cumplir con el objetivo de calibrar el modelo CropSyst para simular la producción de materia seca y el balance hídrico de los cultivos de trigo, colza, lino y arveja proteica en el centro oeste de Entre Ríos se realizó un experimento a campo del que se obtuvieron algunos parámetros para utilizar el modelo y se midieron las variables de desarrollo, crecimiento, rendimiento y de agua en el suelo.

El procedimiento de calibración consistió en seleccionar los parámetros más adecuados del modelo que permitan una simulación aceptable del desarrollo, crecimiento y rendimiento de los cultivos evaluados. La selección de parámetros se realizó utilizando tanto valores por default provistos por el modelo, por procesos iterativos de optimización y medidos en el experimento.

Una vez obtenidos los parámetros se realizó una evaluación del modelo contrastando los valores medidos con los simulados de las variables de desarrollo, crecimiento y rendimiento. Una vez confirmada la confiabilidad de la simulación de dichas variables se validó el resultado de la simulación del agua en el suelo.

En esta sección se presenta una breve caracterización de la zona de estudio, se brindan detalles del experimento realizado y del modelo de simulación utilizado. Asimismo, se describe el procedimiento para realizar la calibración y la validación del modelo y la metodología para realizar un análisis de sensibilidad sobre parámetros que podrían tener impacto sobre el balance hídrico.

2.1 Caracterización de la zona de estudio.

La provincia de Entre Ríos se ubica al noroeste de la República Argentina. Posee una superficie de 78.781 km². Los límites de la provincia están determinados por los ríos Paraná al oeste, Uruguay al este, Mandisoví y Mocoretá al

norte, que la enmarcan y de esta situación deriva su nombre. Entre Ríos se caracteriza por un paisaje de llanura, suavemente ondulada, donde los procesos de erosión hídrica son potencialmente importantes. Los suelos que predominan en la provincia son del orden Vertisol, encontrándose también suelos de los órdenes Molisol, Alfisol y Entisol.

La provincia se caracteriza por tener dos tipos de climas. Al norte un clima subtropical y al centro y sur un clima templado y húmedo. La disposición de los dos tipos de clima determina que la temperatura tenga una disminución progresiva de norte a sur. El clima subtropical determina que los veranos se presenten con temperaturas constantemente elevadas con medias que se sitúan entre los 25 y 26° C, mientras que los inviernos son suaves y benignos, con temperaturas medias que oscilan entre los 10 y 15° C. En cambio, el clima templado que impera al sur de la provincia determina que los veranos sean templados con temperaturas medias de 20° C y los inviernos más acentuados con temperaturas medias de 10° C, siendo frecuentes las heladas desde mayo a septiembre.

Las precipitaciones medias anuales disminuyen desde los 1200 mm en el NE hasta los 900 mm en el SO. Las mayores precipitaciones ocurren en las estaciones de otoño y verano y las menores en invierno y primavera.

2.2 Sitio experimental.

El experimento se llevó a cabo en la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA (31° 50' LS, 60° 31 LO, 110,5 msnm), año 2007. El dpto. Paraná es una de las zonas más diversificadas de la provincia por la variedad de actividades agropecuarias. Dentro de ellas y más importantes son las relacionadas con la agricultura y la ganadería de carne y leche. Focalizando el análisis en la agricultura se destaca la producción en toneladas para cada cultivo y el total en el Dpto. Asimismo, los porcentajes con los que participan los diferentes cultivos (Tabla 1).

Tabla 1: Producción en toneladas de los principales cultivos en Dpto. Paraná y su participación en porcentaje. Campaña 2006/07.

Cultivo	Trigo	Maíz	Soja	Girasol	Sorgo	Lino	Total (tn)
Paraná	14.3250	144.800	45.1500	14.600	58.995	2.090	813.145
Porcentaje	18	18	56	2	7	0,26	100

El suelo donde se realizó el ensayo pertenece al orden Molisol, serie Tezanos Pintos, encontrándose éste en las mayores alturas dentro de los paisajes del Oeste del Dpto. Paraná, en los cuales se han desarrollado los suelos más fértiles y aptos para la agricultura, en su mayoría Argiudoles acuicos. Hacia el este van aflorando materiales arcillosos y más antiguos, dando lugar a los suelos típicos de la provincia, los Vertisoles

2.3 Experimento realizado.

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental tuvo una superficie de 27 m². Se evaluaron cuatro especies: trigo (*Triticum aestivum* L) de ciclo largo y corto, colza (*Brassica napus*), lino (*Linum usitatissimum*) y arveja proteica (*Pisum sp.*). Los cultivares utilizados fueron BIOINTA3004 (trigo ciclo largo), BIOINTA1002 (trigo ciclo corto), Impact (colza), Panambí (lino) y un cultivar no identificado de arveja proteica.

La fecha de siembra tuvo lugar el 15 de mayo de 2007 con maquinaria experimental para todas las especies, excepto el trigo de ciclo corto que se sembró el 12 de julio. Las densidades de siembra utilizadas fueron: BIOINTA3004 9,5 g m⁻², BIOINTA1002 14,1 g m⁻², Panambí 7 g m⁻², Impact 0,7 g m⁻² y el cultivar no identificado de arveja proteica 25,4 g m⁻². La siembra se realizó en forma directa sobre un rastrojo de soja, con una distancia entre surcos de 22 cm. A los 22 días después de la siembra se fertilizó al voleo con 100 kg. N ha⁻¹, lo que equivale a 217 kg ha⁻¹ de urea granulada (46-0-0). En todo momento se tomaron las precauciones necesarias para que

los cultivos estuvieran libres de malezas e insectos. Los resultados del análisis de suelo para diagnóstico de fertilización realizado previo a la siembra se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de suelo. El análisis se hizo a una profundidad de 0-20 cm y los parámetros evaluados fueron: nitrógeno de NO₃ en porcentaje, fósforo (P) por el método Bray en partes por millón (ppm), pH, materia orgánica (M.O.) en porcentaje y nitrógeno (N) en porcentaje.

Prof. (cm)	NO ₃ (ppm)	P bray (ppm)	pH	M.O. (%)	N (%)
0-20	19	14,1	6,8	3,2	0,12

El objetivo del experimento fue relevar los parámetros que se describen en la sección 2.5, con el propósito de calibrar el modelo de simulación.

2.4 Condiciones meteorológicas del experimento.

La temperatura media anual del año 2007 fue 18,1^o C. Las temperaturas medias mensuales para los meses de abril, septiembre y octubre, estuvieron por encima de los valores medios históricos y en los meses de marzo, mayo junio, julio, agosto y noviembre, las temperaturas medias mensuales se encontraron por debajo de los valores históricos. En los meses de enero, febrero y diciembre, las temperaturas medias mensuales fueron normales (Figura 1).

Las temperaturas medias registradas durante el período crítico de definición del rendimiento en los cultivos de trigo, lino, colza y arveja proteica, para los meses de septiembre y octubre estuvieron 2,6 y 1,3^o C respectivamente por encima de los valores medios históricos (Figura 1).

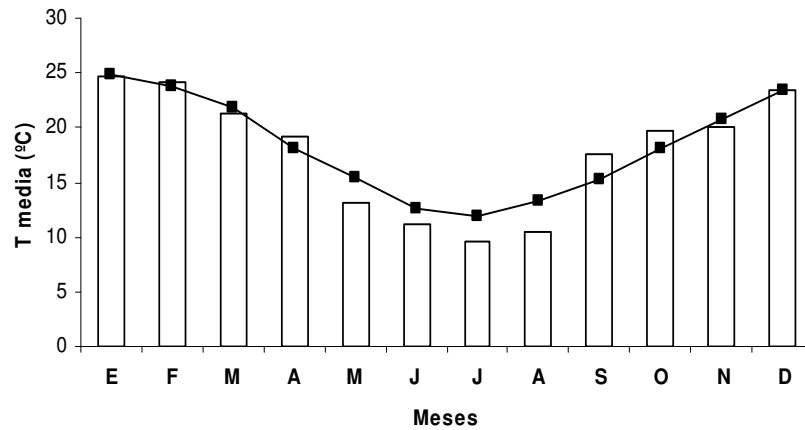


Figura 1. Temperaturas medias mensuales (°C). Las barras blancas indican las temperaturas medias mensuales del año 2007 y la línea continua con símbolos (■) la temperatura normal mensual 1934-2006. Datos Observatorio Agro-meteorológico EEA Paraná.

Con respecto a las precipitaciones, desde la siembra hasta la cosecha del último cultivo (15/05/07 – 30/11/07) se registraron 294,6 mm. En términos generales para los diferentes cultivos y durante el crecimiento y desarrollo de los mismos, las precipitaciones registradas fueron superiores a las normales para los meses de mayo, septiembre y octubre. En cambio, en los meses de junio, julio, agosto y noviembre, las precipitaciones estuvieron por debajo de las normales (Figura 2).

Las precipitaciones comprendidas en el período crítico de la definición del rendimiento para los cultivos de trigo, lino, colza y arveja proteica, para los meses de septiembre y octubre han sido 114 y 119,6 mm, respectivamente, mayores con relación a los valores medios históricos (Figura 2).

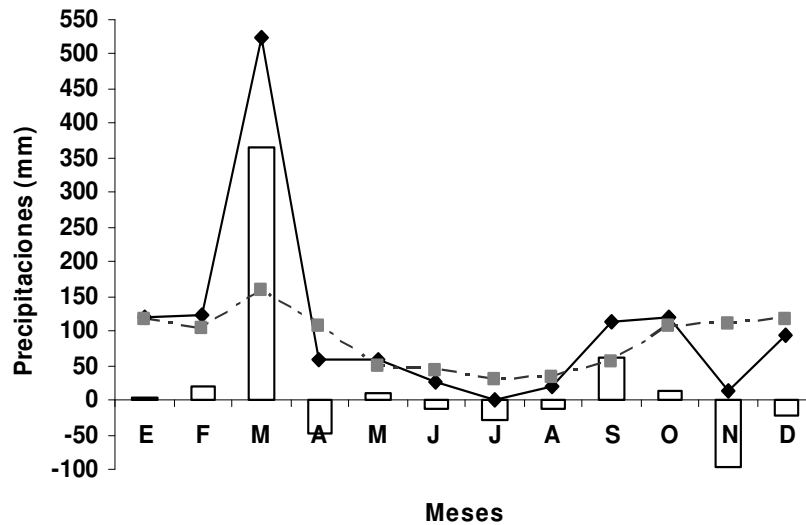


Figura 2. Precipitaciones (mm) mensual, normal año 1934-2007 y balance. La línea discontinua gris con símbolos (■) indica las precipitaciones medias normales, la línea continua negra con símbolos (◆) las precipitaciones medias mensuales del año 2007 y las barras blancas el balance entre las precipitaciones y la ETP (Penman-Monteith).

2.5 Parámetros evaluados:

2.5.1 Estados fenológicos.

Semanalmente se realizó la determinación del estado fenológico en que se encontraban los cultivos. En el caso del trigo, se utilizó la Escala de Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974); para el lino se recurrió a la Escala desarrollada por Freer (1991); para la colza se utilizó la clasificación europea (INRA-CETIOM, 1988) y en el caso de la arveja proteica se trabajó con una escala adaptada de una publicación francesa (Bariffi, H., comunicación personal).

2.5.2 Humedad del suelo.

La determinación del contenido de humedad en el perfil del suelo se realizó cada 15 días aproximadamente en cada parcela, utilizando un barreno helicoidal. Las determinaciones se establecieron extrayendo muestras de suelo cada 10 cm de profundidad hasta el metro. Posteriormente, se llevaron al laboratorio donde se registró su peso húmedo y luego las muestras fueron colocadas en bandejas para ser llevadas a estufa a una temperatura de 105° C por 48 horas. Pasado el tiempo de espera, las muestras fueron pesadas nuevamente para estimar por el método gravimétrico el contenido de humedad. Si bien los muestreos se hicieron hasta 1 m de profundidad, solo se consideraron para el estudio del balance de agua los primeros 0,50 m por encontrarse la mayor cantidad de raíces en este espesor.

Fórmulas utilizadas para determinar la humedad del suelo:

- Humedad Gravimétrica (HG):

$$\text{HG (g/g)} = (\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) / (\text{peso seco} - T^*)$$

*T: tara del recipiente que contenía la muestra de suelo en estudio.

- Humedad Volumétrica (HV):

$$\text{HV (cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}) = \text{HG} * \text{Densidad aparente}$$

- Agua Total (AT):

$$\text{AT} = \text{HV (cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}) * \text{espesor de suelo (mm)}$$

2.5.3 Radiación interceptada por el cultivo.

La radiación solar fotosintéticamente activa interceptada (RFA_{int} MJ m^{-2}) se midió cada 15 días aproximadamente sobre y debajo del canopeo en cinco sectores de cada parcela con un sensor lineal cuántico (Cavadevices, Buenos Aires), cubriendo un metro de ancho. Luego se promediaron los valores obtenidos del estrato inferior y por diferencia con el estrato superior se obtuvo la RFA_{int} .

Fórmula utilizada para determinar la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFA_{int}):

$$RFA_{int} = ((RTC - RDC) / RTC) * 100$$

Donde:

RTC: radiación incidente al tope de la canopia

RDC: radiación incidente debajo canopia

2.5.4 Biomasa.

Se realizaron cuatro muestreos en los diferentes cultivos en las siguientes fechas: 15/08/07, 24/09/07, 10/10/07 y 31/10/07. El primer muestreo se hizo cortando manualmente dos surcos centrales de 0,30 m de longitud (0,132 m^2). En los restantes muestreos se cortaron manualmente tres surcos centrales de 0,30 m (0,198 m^2). Una vez recolectadas las muestras se partitionaron en hoja y tallo. Posteriormente, se tomó una alícuota de las hojas para medición del área foliar. La alícuota de hojas fue de aproximadamente un cuarto de la muestra. Todo el material vegetal se llevó a estufa a 65° C por 96 horas. Una vez secas, las muestras fueron pesadas.

2.5.5 Índice de área foliar (IAF).

El índice de área foliar fue calculado mediante la medición de sub-muestras de hojas con un medidor de área foliar (modelo LI-3000, Li-Cor) y los datos de la partición relevados en la sección anterior.

2.5.6 Área foliar específica (SLA).

El área foliar específica (SLA) fue calculada con el área foliar del medidor y el peso seco de las sub-muestras de hojas.

2.5.6 Rendimiento.

Para determinar rendimiento de los cultivos se cortaron manualmente los cuatro surcos centrales de cada parcela, tomando una longitud de 2 m (1,76 m²). Los cortes se realizaron en madurez fisiológica y esto ocurrió en las siguientes fechas: trigo de ciclo largo el 25/11/07, trigo de ciclo corto el 30/11/07, colza el 25/11/07, lino 20/11/07 y arveja proteica el 15/11/07. Luego, las muestras fueron trilladas y pesadas. El rendimiento se corrigió conforme con la humedad del estándar de recibo de cada uno de los cultivos.

2.6 Descripción del modelo.

Se utilizó CropSyst versión 4.1 (Stöckle y Nelson, 2003). CropSyst es un conjunto de programas diseñados para trabajar proporcionando a los usuarios herramientas para analizar la productividad y el impacto ambiental de la rotación de cultivos y la gestión de los sistemas de cultivo en las diversas escalas temporales y

espaciales. Los principales componentes CropSyst son: Editor de parámetros CropSyst, un simulador de sistemas de cultivo (modelo CropSyst), un generador de tiempo (ClimGen), una simulación en SIG CropSyst (ArcCS) y una herramienta de análisis de cuencas hidrográficas (Cuencas CropSyst).

El **EDITOR DE PARÁMETROS** del modelo sirve como principal interfaz del usuario y proporciona los archivos de simulación que contienen información que permite construir condiciones de simulación a partir de una base de datos conformada por archivos existentes sobre ubicación, suelo, cultivo y manejo. Estos archivos también contienen información con respecto al período de simulación y los valores iniciales del contenido de agua ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), nitrógeno de NO_3 (kg N ha^{-1}), nitrógeno de NH_4 (kg N ha^{-1}), materia orgánica (%), salinidad (dS m^{-1}), para las variables del modelo que requieren inicialización. Los archivos de simulación son creados y modificados mediante el uso del Editor de Parámetros.

CROPSYST. Es el simulador de sistemas de cultivo y el eje central del conjunto programas. Contiene todos los objetos necesarios, procedimientos y funciones para simular la productividad y rotación de los cultivos, en respuesta al clima, al suelo y al manejo. El modelo simula un bloque de tierra único. Un bloque de fragmentos de la tierra representa una unidad de área biofísica homogénea con un régimen uniforme de manejo. Escenarios de simulación de fragmentos de bloques de la tierra son creadas por la preparación de los archivos de parámetros que describen el clima, suelo, cultivos y manejo de los mismos. El archivo de control de simulación identifica y une a todos los archivos de entrada, ofrece las condiciones iniciales, selecciona los módulos opcionales de simulación y especifica el escenario a simular

ClimGen es un generador de tiempo que produce precipitaciones, temperatura diaria máxima y mínima, radiación solar, humedad y velocidad del viento. Todos los parámetros de generación se calculan para cada sitio de interés. Las características adicionales permiten a los usuarios estimar la presión de vapor atmosférica y radiación solar.

ARCCS. Facilita SIG basado en proyectos de simulación mediante el uso de polígonos CropSyst derivados de ArcView o Arc / Info GIS. Cada polígono representa un fragmento de bloque de la tierra. ArcCS utiliza la tabla de atributos de polígonos producidos por el software SIG para identificar, generar y ejecutar un escenario de simulación para cada fragmento de la tierra, de esta manera se pueden elaborar mapas con las salidas de CropSyst.

CROPSYST CUENCA es una extensión de las capacidades de CropSyst ArcCS en fragmentos de bloque de tierra, que se define como las células de trama en una cuadrícula en lugar de polígono, hidrológicamente conectado. Al igual que en el módulo ArcCS, el modelo de cuenca compone un escenario de simulación para cada celda de la cuadrícula. CropSyst Cuenca utiliza Arcview para la extensión de Windows y un análisis espacial de la geografía del territorio. El análisis del territorio para Arcview permite al usuario definir los límites de las cuencas hidrográficas y la red de drenaje de los modelos digitales de elevación de los datos. Además, proporciona herramientas a los mapas de combinación y superposición de rastrear polígonos base (producida por ArcCS) que representan una combinación única de suelos, uso de la tierra, la gestión, y otras características dentro de la cuenca.

El **BALANCE DE AGUA** del modelo incluye la precipitación, el riego, la escorrentía, interceptación, infiltración de agua, la redistribución del agua en el perfil del suelo, percolación profunda, la transpiración del cultivo y la evaporación. La redistribución de agua en el suelo puede ser simulado por los método en cascada o diferencias finitas. CropSyst ofrece dos opciones para calcular la evapotranspiración del cultivo ET (ET0): el modelo de Penman-Monteith (Monteith, 1965) y el modelo de Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972). La implementación del modelo de Penman-Monteith sigue la metodología sugerida por la FAO (Allen et al., 1998). Esta opción requiere de la siguiente información: temperatura diaria máxima y mínima, la radiación solar, la humedad máxima y mínima (o punto de rocío) y la velocidad del viento. Contrariamente, el modelo de Priestley-Taylor sólo requiere datos de temperatura y la

radiación, pero el usuario debe proveer de un valor adecuado de la constante de Priestley-Taylor. ClimGen, por su parte, permite a los usuarios estimar la radiación solar diaria y la humedad de la temperatura, como así también generar datos diarios, siempre que estén disponibles registros completos y diarios de al menos 2 años.

A continuación se describen los modelos de infiltración para el transporte de agua en el suelo: a) de cascada y b) diferencias finitas:

a) El método de cascada simula la transferencia de agua desde el horizonte superficial hasta los horizontes profundos del suelo y eventualmente hasta la capa freática (Figura 3). De acuerdo a este método, el volumen de agua que infiltra al perfil por la lluvia neta (descontado el escurrimiento superficial) percola, distribuyéndose entre los horizontes del suelo desde la superficie hasta los horizontes más profundos. En cada horizonte, el contenido de agua se incrementa hasta alcanzar la capacidad de campo. El exceso, se transmite hacia el horizonte subyacente y así sucesivamente hasta agotar el volumen de agua ingresado al perfil. De esta forma, la transferencia de agua entre horizontes, puede alcanzar la capa freática. El cálculo de la máxima capacidad de retención de agua de cada horizonte se realiza mediante una función de pedotransferencia (Campbell, 1985), que utiliza como parámetros de entrada el contenido de arcilla, de limo y la densidad aparente.

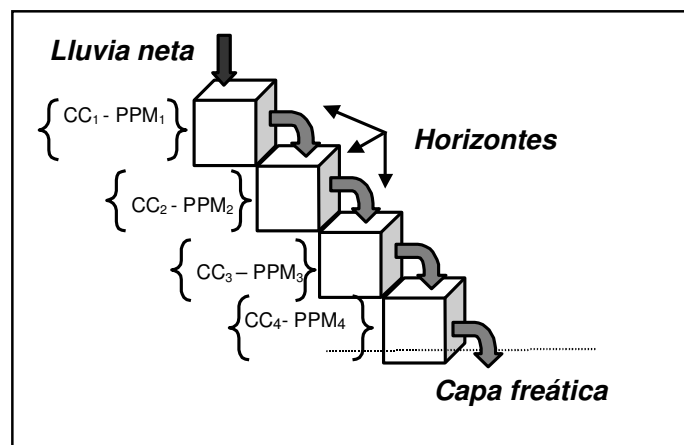


Figura 3. Esquema del método de cascada

b) En el método de las diferencias finitas, el flujo de agua puede ser ascendente o descendente. El transporte y almacenamiento de agua dentro del suelo están representados por una red de conductores y capacitores. La solución numérica de la red es alcanzada mediante métodos numéricos para determinar cómo cambian el contenido hídrico y el potencial agua en el tiempo y en cada nodo de la red (Figura 4).

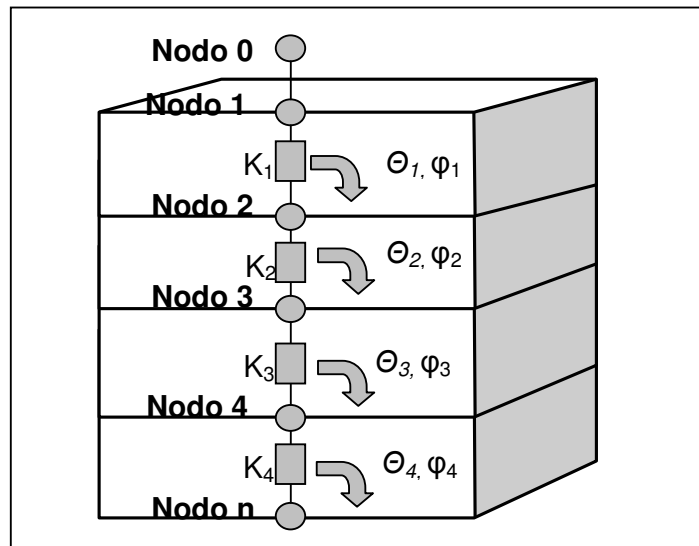


Figura 4. Esquema del método de las diferencias finitas

En cada nodo, el cambio en el almacenaje de agua está dado por la ecuación de Richards (1984):

$$\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] + g \frac{\partial k}{\partial z} - S$$

Donde:

ρ_w : es el potencial del agua (1000 kg m^{-3})

θ : es el contenido hídrico volumétrico ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)

z : es la profundidad de cada horizonte (m)

k: es la conductividad hidráulica (kg s m^{-3})

ψ : es el potencial agua mátrico del suelo (J kg^{-1})

g: es la constante gravitatoria ($9,8 \text{ m s}^{-2}$).

S: es un término de fuente o destino de agua, que en el modelo representa la absorción de agua ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-3}$) por parte del sistema de raíces.

El **BALANCE DE NITRÓGENO** en CropSyst contiene balances separados para el nitrato y el amonio. Los procesos incluyen transformaciones de N, absorción de amonio, fijación simbiótica de nitrógeno, demanda de nitrógeno de los cultivos y la absorción de nitrógeno de los cultivos. Además, de realizar la transformación del nitrógeno (mineralización, nitrificación y desnitrificación) y la adsorción de amonio. Los balances de agua y de nitrógeno interactúan para producir una simulación del transporte de N en el suelo. Los balances de otras sustancias químicas como la salinidad también interactúan con el balance de agua. Todos los balances son revisados durante una simulación, y los errores son reportados.

FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS. La simulación del desarrollo del cultivo se basa en el tiempo térmico, que es la acumulación diaria requerida de la temperatura media del aire por encima de la temperatura base y por debajo de una temperatura límite para llegar a determinadas etapas de crecimiento. La acumulación de tiempo térmico puede ser acelerada por el estrés hídrico. Esto puede ser conceptualizado como una respuesta a la temperatura de los cultivos. Cuando la simulación de un determinado cultivo se lleva a cabo en sitios dispares o para una amplia gama de fechas de siembra, el tiempo térmico por sí solo no puede ser un buen predictor del desarrollo. Por tanto, los requerimientos de la vernalización y el fotoperiodo deberían ser considerados. En este estudio no se incluyeron en las simulaciones las

respuestas del cultivo a la vernalización y al fotoperíodo. Por lo tanto, estos parámetros de selección fueron deshabilitados.

ACUMULACIÓN DE BIOMASA. La Figura 5 muestra un diagrama de flujo que describe el enfoque utilizado en CropSyst para la acumulación de biomasa (calculado diariamente). El núcleo de estos cálculos es la determinación del crecimiento de la biomasa sin stress (potencial) sobre la base de la transpiración del cultivo y intercepción del PAR (radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo). Este crecimiento potencial se corrige luego por las limitaciones de agua y nitrógeno, en su caso, para determinar la ganancia real de la biomasa diaria.

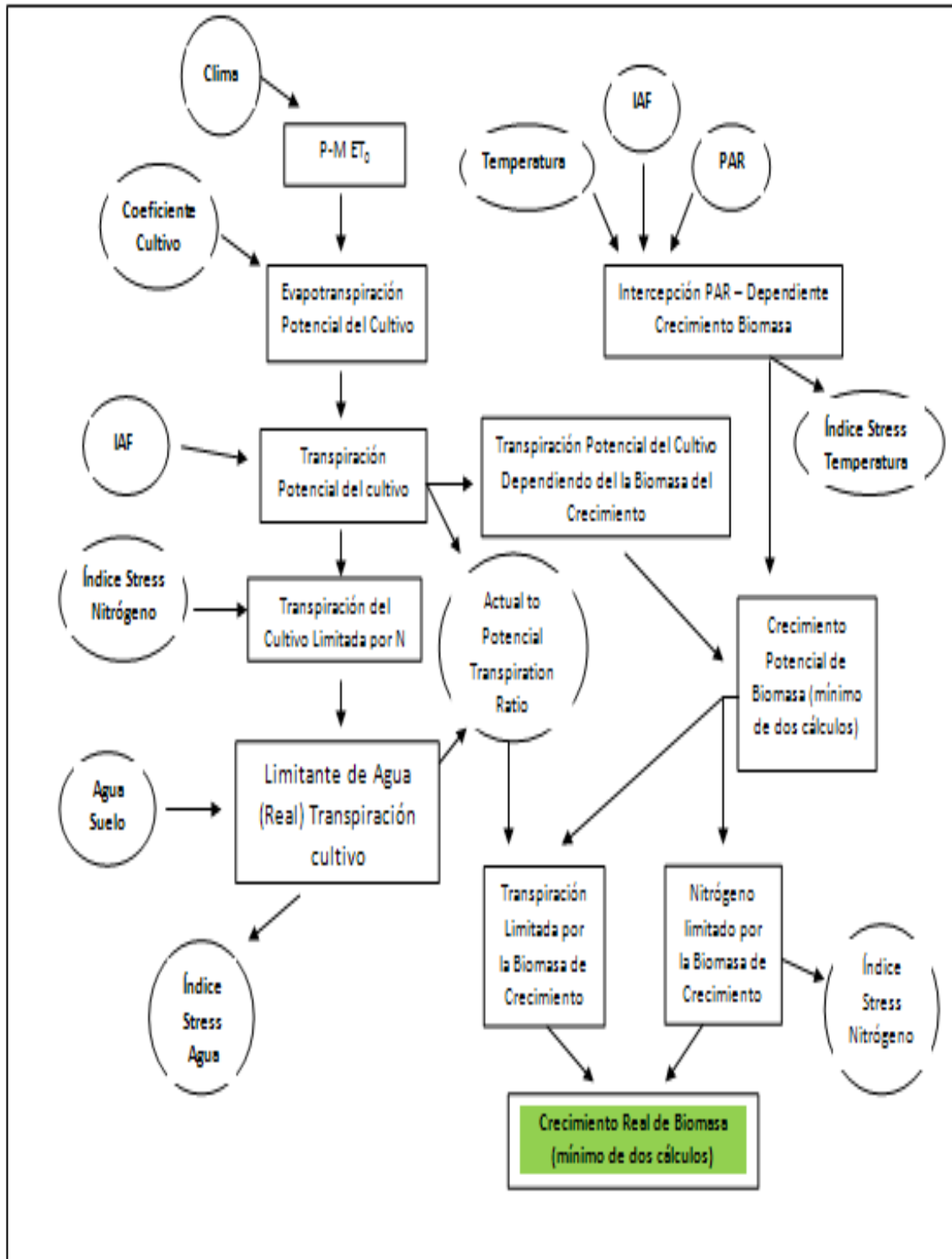


Figura 5. Diagrama de flujo del cálculo de crecimiento en CropSyst

Teniendo en cuenta la vía común del carbono en las hojas y el intercambio de vapor, hay una relación conservadora entre la transpiración del cultivo y

producción de biomasa. Por lo tanto, el potencial de la producción de biomasa diaria se puede calcular como (Tanner y Sinclair, 1993):

$$(1) B_{PT} = K_{BT} \frac{T_P}{VPD}$$

Donde B_{PT} es la transpiración potencial del cultivo dependiente de producción de la biomasa ($\text{kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T_P es la transpiración potencial del cultivo ($\text{kg m}^2 \text{ día}^{-1}$), VPD déficit de presión de vapor atmosférica media durante el día (kPa) y K_{TB} es el coeficiente de biomasa-transpiración (KPa). Los valores de este último parámetro están disponibles en la literatura (Tanner y Sinclair, 1983; Loomis y Connors, 1992).

La relación de Tanner-Sinclair se vuelve inestable a valores bajos VPD , de hecho se podría predecir un crecimiento infinito en VPD cercano a cero. Para superar este problema, una segunda estimación de la producción de biomasa se calcula siguiendo Monteith (1997):

$$(2) B_{IPAR} = e IPAR$$

Donde B_{IPAR} es la radiación fotosintéticamente activa interceptada (PAR) dependiente de la producción de biomasa ($\text{kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), “e” es la eficiencia de uso de la radiación (kg MJ^{-1}) y $IPAR$ es la cantidad diaria de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

Los valores para el parámetro “e” en la ecuación. (2) están disponibles en la literatura (por ejemplo: Diaz Ambrona *et al.*, 2005, Kiniry *et al.*, 1989, Marcos, 2000). Sin embargo, estos valores tienden a presentar una gran variabilidad. Para el enfoque aplicado en CropSyst, es importante seleccionar los valores de los experimentos con cultivos sin estrés y en ambientes de baja VPD . A pesar de que el parámetro “e” incluye el efecto del régimen de la temperatura imperante en su determinación experimental, las limitaciones de temperatura durante el crecimiento inicial normalmente no se cuenta. Esto puede resultar en sobre predicción de la producción de biomasa durante el crecimiento inicial a baja temperatura, sobre todo en

el caso de los cultivos de invierno o de los cultivos sembrados en principios de la primavera. Un factor de limitación temperatura está incluido en CropSyst para corregir el valor de “e” durante el crecimiento inicial, que se supone que aumentan de forma lineal (de 0 a 1) la temperatura del aire oscila entre la temperatura de base para el desarrollo y una temperatura óptima para el crecimiento temprano.

Durante cada día de simulación, la producción de biomasa potencial para el día (BP) es tomado como el mínimo de B_{PT} y B_{IPAR} . Este valor se utiliza como base para calcular la producción real de la biomasa diaria.

Por lo tanto, el crecimiento potencial del cultivo está limitado por la radiación y el agua.

Producción de biomasa dual en función de la radiación y la transpiración:

$$\boxed{G_{IPAR} = e f_{int} PAR) + (G_{TR} = K_{BT} T / VPD) = B = \text{Min} (GTR , GIPAR)}$$

Por lo expuesto, el crecimiento del cultivo es calculado por el modelo como el mínimo del crecimiento limitado por agua y el mínimo de crecimiento limitado por radiación.

REQUISITOS DE DATOS. Cinco archivos de datos de entrada son necesarios para ejecutar CropSyst: control de la simulación, la ubicación, suelo, cultivo y manejo. La separación en archivos permite un enlace más fácil de las simulaciones con CropSyst y con el software GIS. Definiciones, uso y la gama de variaciones de todos los parámetros requeridos por CropSyst se dan en el manual del usuario (Stöckle y Nelson, 2000) y también están disponibles en la función de Ayuda de la interfaz del modelo.

El archivo de **CONTROL DE SIMULACIÓN** combina los diferentes tipos de archivos de entrada como se desee para producir corridas de simulación

específicos. En él se especifica el comienzo y el día final de las simulaciones. Además, las entradas de este archivo permite a los usuarios activar / desactivar la simulación de la erosión del suelo, la salinidad del suelo, el nitrógeno y los efectos del CO₂ en el crecimiento de los cultivos, para seleccionar la redistribución de agua en el suelo y los modelos de escorrentía.

El archivo de **UBICACIÓN** se refiere a información que es específica al sitio de estudio. Se pueden seleccionar dos tipos de archivo de datos sobre el clima: a) el formato base de datos de archivos de clima UED que almacena todos los datos para la ubicación en un único archivo de base de datos y b) el formato archivo de texto Cropsyst que ubica los datos de clima para cada año en archivos separados con nombres de archivo compuestos de un código de prefijo y un año de cuatro dígitos.

Los archivos de clima contienen los siguientes parámetros diarios: precipitaciones (mm), temperatura (°C) (máxima y mínima), radiación solar incidente (MJ m⁻²), punto de rocío (°C) (máximo, mínimo y medio), vientos (m s⁻¹) y la radiación solar global. También, se puede ingresar información referente a la longitud y latitud, a la elevación sobre el nivel del mar y otras características geográficas.

Siguiendo con la descripción de los parámetros de ubicación, CropSyst permite al usuario optar entre modelos de simulación de evapotranspiración de referencia (Priestley-Taylor o Penman-Monteith) en función de los datos de clima disponibles. El modelo examinará los datos del archivo de clima para cada año que se procesa y seleccionará de manera automática el modelo de evapotranspiración que se usará para ese año.

El archivo de **SUELO** incluye las características generales de suelo, textura y propiedades hidráulicas, tales como: número de horizontes, espesor (m), arcilla (%), arena (%), limo (%), a partir de las que el modelo calcula el punto de marchitez permanente (cm⁻³ cm⁻³), capacidad de campo, densidad aparente, intercambio catiónico y pH, Con base en esta información, las funciones pedotransferencia se utilizan para calcular la densidad aparente, contenido volumétrico

de agua en el potencial hídrico de -33 kPa (capacidad de campo) y -1500 kPa (punto de marchitez permanente), el potencial de entrada de aire y el valor Cambell b de la relación entre contenido volumétrico de agua y de agua potencial (Campbell, 1985). Siempre que sea posible, las medidas reales en vez de los valores estimados a partir de la textura, se puede utilizar.

El archivo de **MANEJO** incluye la gestión de los eventos programados y automáticos. La gestión de eventos pueden ser programados con la fecha actual, fecha relativa (con respecto al año de la plantación), o mediante la sincronización con los eventos fenológicos (por ejemplo, número de días después de la floración). Los eventos programados son de riego (fecha de la solicitud, la cantidad y la concentración de la salinidad), la fertilización con nitrógeno (fecha de la solicitud, la cantidad, fuente y modelo de aplicación), las operaciones de labranza y manejo de los residuos. El administrador de eventos automático (riego y fertilización nitrogenada) comprueba continuamente el agua del suelo y el contenido de nitrógeno y se puede especificar para proporcionar una gestión para el crecimiento máximo, o para implementar estrategias de déficit.

El archivo de los **CULTIVOS** permite a los usuarios el acceso a un conjunto común de parámetros para representar a los diferentes cultivos y variedades de los mismos. El archivo se estructura en las siguientes secciones: fenología (los requerimientos térmicos para llegar a las etapas específicas del crecimiento), morfología (máximo IAF, profundidad de las raíces, el área foliar específica, duración del área foliar y otros parámetros que definen las características del dosel y la raíz), el crecimiento (coeficiente de transpiración de biomasa, uso de la eficiencia de radiación, los parámetros de respuesta al stress, etc.), residuos (descomposición y los parámetros de los residuos de cultivos), nitrógeno (demanda de N por los cultivos y su absorción por las raíces), el índice de cosecha (índice de cosecha sin estrés y los parámetros de sensibilidad al stress), tolerancia a la salinidad, y la respuesta del aumento de CO₂. Los parámetros de entrada de cultivo son los únicos que requieren una calibración para

poder representar adecuadamente los cultivos y sus variedades. Sin embargo, los parámetros que definen la mayor parte de la respuesta de los cultivos para el medio ambiente y el manejo, se puede determinar a través de experimentos de campo. El conjunto básico de datos experimentales debe incluir la evolución de la estación de crecimiento de la biomasa (hojas y tallo), el índice de área foliar (IAF), la radiación fotosintéticamente activa interceptada (PAR), humedad del suelo, el tiempo diario durante la estación de crecimiento del cultivo, la biomasa total en la cosecha y el rendimiento.

INFORMES DE SALIDA de CropSyst están diseñados para soportar una serie de opciones variables de salida. Se pueden generar alrededor de 200 variables computarizadas diferentes en un formato definible por el usuario. También, se pueden visualizar gráficos de tiempo de ejecución que proporcionan un feedback visual rápido sobre el progreso de simulación.

Hay cuatro tipos de variables de salida: a) variables diarias; b) variables anuales que proporcionan un resumen de los valores acumulados a lo largo del año calendario; c) variables de cosecha que proporcionan el rendimiento y las condiciones relevantes de cultivo y suelo al momento de la cosecha, acumulados a lo largo de la estación de crecimiento y d) el perfil de suelo actual también se puede imprimir para fechas seleccionadas.

2.7 Calibración y optimización de parámetros

La metodología de calibración incluyó una primera aproximación a partir de parámetros predeterminados por el modelo agronómico y de valores medidos en el experimento. Los parámetros **predeterminados en el modelo** surgieron a partir de las especies cargadas en el mismo (default), tales como el trigo primaveral (*spring wheat*), el lino (*flax*), la colza (*rapeseed*) y la arveja (*pea*). Los parámetros utilizados por default fueron: índice de área foliar verde inicial, duración de la sensibilidad de la hoja al

estrés hídrico, actividad potencial que limita el área de crecimiento de hoja, actividad potencial que limita el crecimiento de raíces, longitud de raíz por unidad de raíz, densidad de superficies de raíces, curvatura de raíz con la densidad de la distribución, ET del cultivo con cobertura total, máxima absorción de agua, potencial de agua en la hoja para cierre estomático, agua potencial marchitamiento de hojas. Los parámetros mencionados figuran en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros utilizados para simular trigo ciclo largo, trigo ciclo corto, lino, colza y arveja obtenidos por default en el modelo agronómico.

Parámetros	Unidades	Trigo ciclo largo	Trigo ciclo corto	Lino	Colza	Arveja
Especie utilizada y registrada en el modelo		Spring Wheat	Spring Wheat	Flax	Rapeseed	Pea
Morfología de cultivos						
Índice de área verde inicial	m ² /m ²	0.001	0.001	0.001	0.007	0.001
Duración de la sensibilidad de la hoja al estrés hídrico	Adimensional	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Crecimiento de cultivos						
Act. potencial que limita el área de crecimiento de hoja	Adimensional	-800	-800	-800	-800	-800
Act. potencial que limita el crecimiento de raíces	Adimensional	-1200	-1200	-1200	-1200	-1200
Longitud de raíz por unidad de raíz	km/kg	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
Densidad de superficies de raíces	cm/cm ³	6.00	6.00	3.00	3.00	3.00
Curvatura de raíz con la densidad de la distribución	Adimensional	4.00	4.00	1.00	1.00	1.00
Transpiración de cultivos						
ET del cultivo con cobertura total	Adimensional	1.05	1.05	1.05	1.00	1.00
Máxima absorción de agua	mm/día	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Potencial de agua en la hoja para cierre estomático	J/kg	-700	-700	-700	-700	-1000
Agua potencial marchitamiento de hojas	J/kg	-1800	-1800	-1600	-1600	-1500

La metodología de **optimización** de los parámetros se realizó mediante un proceso repetitivo de la observación de los resultados de la simulación (salidas del modelo) en los diferentes cultivos modificando arbitrariamente, dentro del rango biológico, algunos parámetros clave hasta obtener un resultado aceptable en la salida del modelo (iteración). Los parámetros obtenidos por optimización fueron: la fenología en tiempo térmico, temperatura base, temperatura de corte, temperatura de emergencia, máximo crecimiento de raíces, fin de crecimiento vegetativo, comienzo de floración, comienzo de llenado de granos, madurez fisiológica, máxima área foliar (LAI),

coeficiente de partición tallo/hoja, duración de hoja, porcentaje máximo de LAI en la madurez fisiológica, temperatura media diaria optima, máximo tamaño de raíces, coeficiente de extinción de la radiación solar. Los parámetros mencionados figuran en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros utilizados para simular trigo ciclo largo, trigo ciclo corto, lino, colza y arveja obtenidos por optimización del modelo agronómico.

Parámetros	Unidades	Trigo ciclo largo	Trigo ciclo corto	Lino	Colza	Arveja
Especie utilizada y registrada en el modelo		Spring Wheat	Spring Wheat	Flax	Rapeseed	Pea
Desarrollo de cultivos						
Temperatura base	° C	3	3	4.90	4	3
Temperatura de corte	° C	25	25	25	25	25
Temperatura de emergencia	° C d	100	100	350	230	100
Máximo crecimiento de raíces	° C d	1200	1000	1155	1000	800
Fin del crecimiento del estado vegetativo	° C d	1100	950	1000	950	750
Comienzo de floración	° C d	1200	1000	1155	1000	800
Comienzo de llenado de granos	° C d	1400	1200	1300	1200	1100
Madurez fisiológica	° C d	2000	1600	1700	1700	1600
Morfología de cultivos						
Máxima área foliar (LAI)	m ² /m ²	6.00	6.00	3.00	5.00	5.00
Coeficiente de partición tallo/hoja	Adimensional	4.00	4.00	3.00	4.00	3.00
Duración de hoja	° C días	830	660	800	900	850
Porcentaje máximo de LAI en la madurez fisiológica	Adimensional	1.00	0.98	0.80	0.75	0.75
Crecimiento de cultivos						
Temperatura media diaria optima	° C	10	10	5	10	10
Máximo tamaño de raíces	m	1.80	1.80	1.50	1.50	1.20
Coeficiente de extinción de la radiación solar	Adimensional	0.70	0.76	0.60	0.50	0.70

Los parámetros que se obtuvieron del **experimento a campo** fueron:

la eficiencia de conversión de luz solar a biomasa “e”, el coeficiente de transpiración (K_{BT}), el área foliar específica (SLA) y el índice de cosecha, ubicación, clima y suelo. Siendo los más importantes los coeficientes “ K_{BT} ” y “e”. Los parámetros mencionados figuran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros utilizados para simular trigo ciclo largo, trigo ciclo corto, lino, colza y arveja obtenidos del experimento a campo.

Parámetros	Unidades	Trigo ciclo largo	Trigo ciclo corto	Lino	Colza	Arveja
Especie utilizada y registrada en el modelo		Spring Wheat	Spring Wheat	Flax	Rapeseed	Pea
Morfología del los cultivos						
Área específica de hoja (SLA)	m ² /kg	18.50	17.60	24.60	23.70	24.00
Coefficiente de transpiración-biomasa (K _{BT})	kpa Kg/m ³	10,34	10,34	5.81	8.96	7.30
Conversión de luz solar a biomasa (PAR) (e)	gr/MJ	2.70	2.70	1.65	2.46	2.02
Índice de Cosecha						
Índice de cosecha	Adimensional	0.34	0.37	0.30	0.23	0.44

El coeficiente “e” fue obtenido de la pendiente de la regresión lineal entre la IPAR y la biomasa acumulada registradas en el experimento realizado. La IPAR diaria se estimó a partir de las mediciones frecuentes de la fracción de RFA interceptada (Figura 6 A, B, C y D).

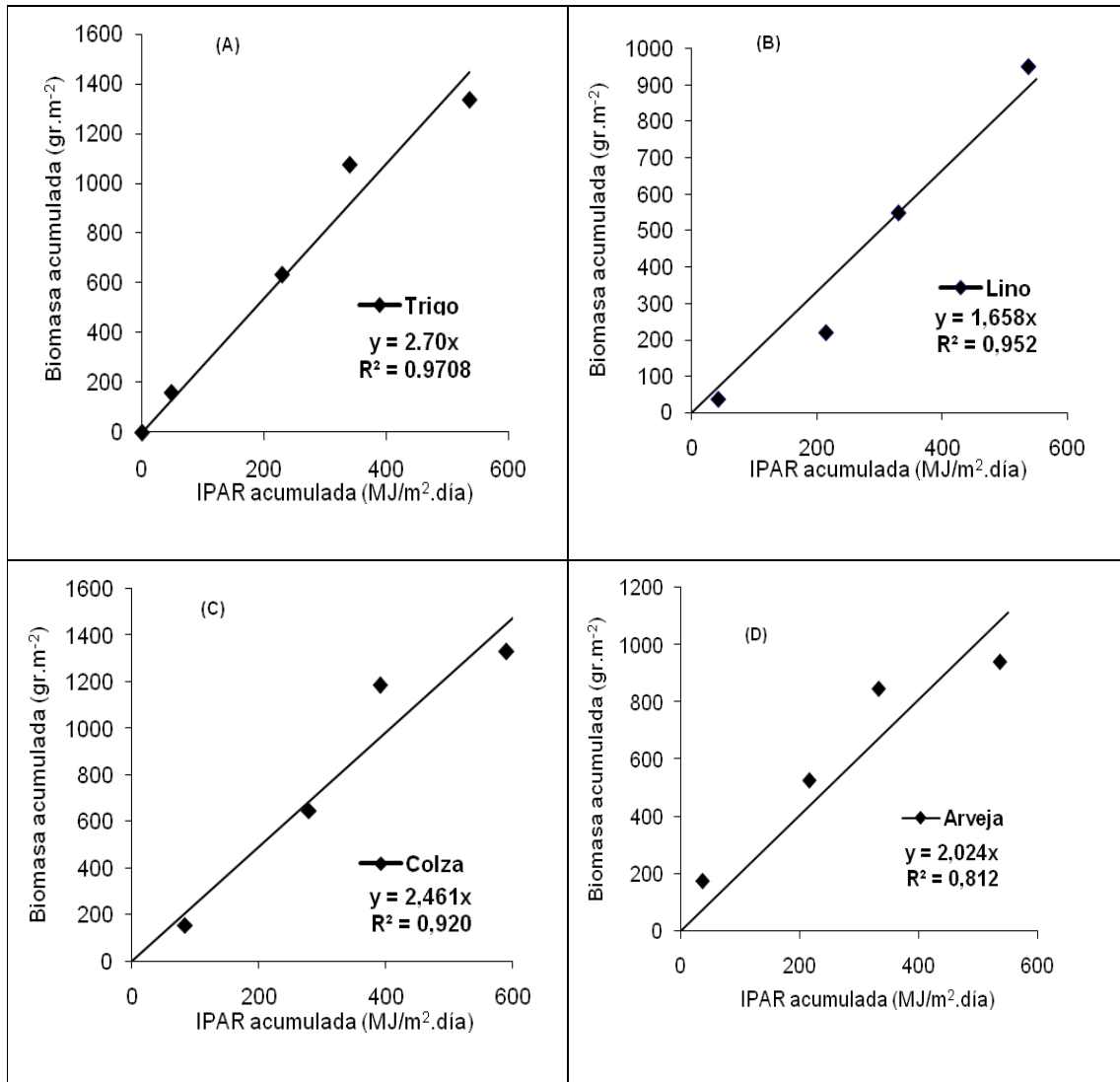


Figura 6. Máxima eficiencia de uso de radiación “e” en trigo (A), lino (B), colza (C) y arveja (D). La IR diaria se estimó a partir de las mediciones frecuentes de la fracción de RFA interceptada, utilizando una función de interpolación optimizada mediante el uso de la función Solver de Microsoft Excel.

El “ K_{BT} ” fue obtenido de la pendiente entre la transpiración y la biomasa acumulada. La transpiración diaria se estimó como el producto de la IPAR por la evapotranspiración potencial de Penman (ETP) sobre el déficit de presión de vapor, siguiendo la metodología de Marcos (2000). La pendiente de la regresión entre biomasa acumulada y transpiración acumulada representa el valor de K_{BT} (Figura 7 A, B, C y D).

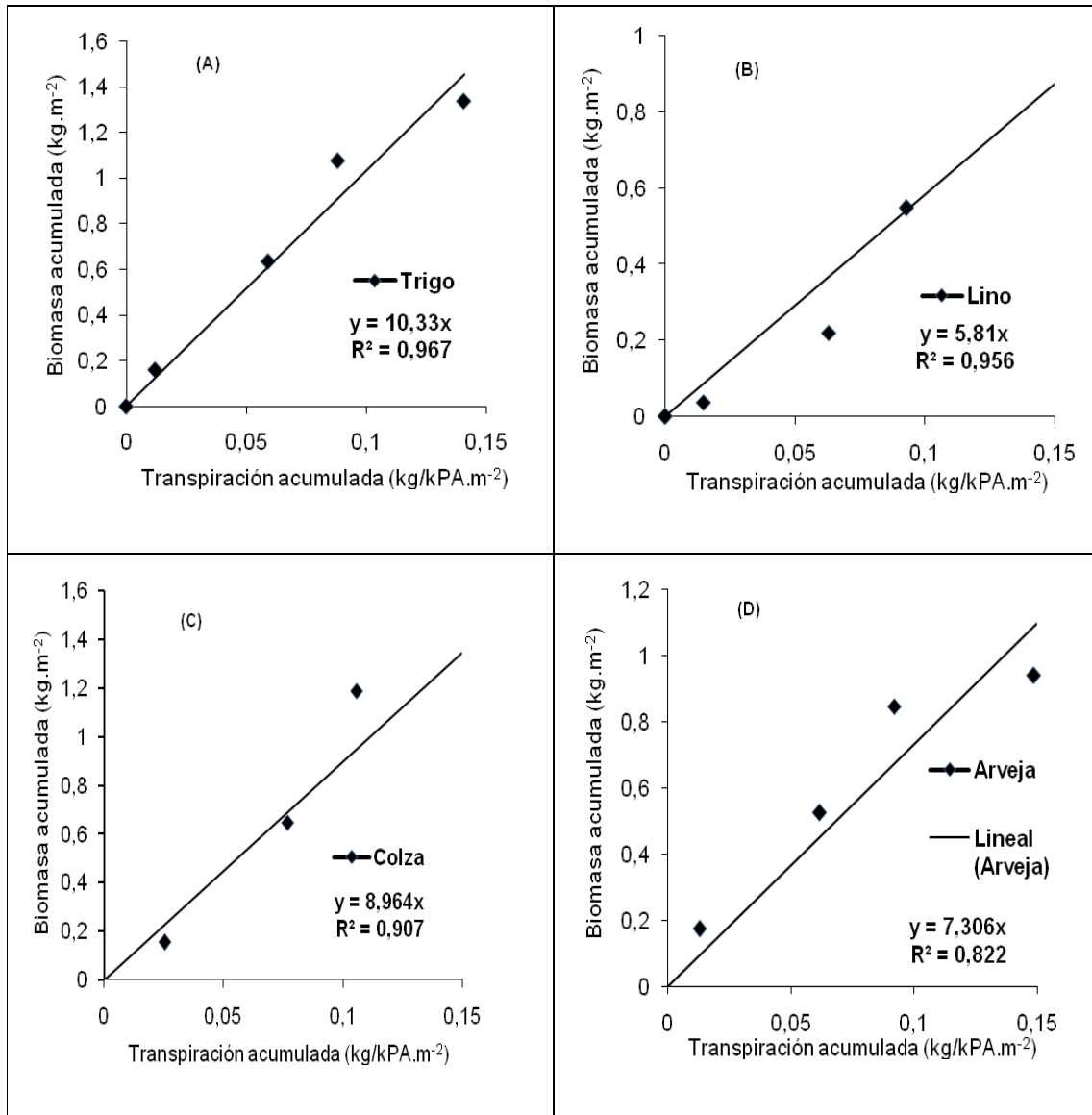


Figura 7. Coeficiente de transpiración-biomasa (K_{BT}) en (A) trigo, (B) lino, (C) colza y (D) arveja. La transpiración diaria se estimó como el producto de la IR por la Evapotranspiración potencial de Penman (ETP) sobre el déficit de presión de vapor. La pendiente de la regresión entre biomasa acumulada y transpiración acumulada representa el valor de K_{BT} utilizando una función de interpolación optimizada mediante el uso de la función Solver de Microsoft Excel.

Asimismo, los parámetros de los archivos de ubicación y clima provinieron del observatorio meteorológico de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA.

Los parámetros del archivo de suelo se completaron con la información disponible en la Carta de Suelos del Dpto. Paraná, Serie Tezanos Pinto.

Debe mencionarse que la lista de parámetros utilizados en este trabajo no constituye de ninguna manera una propuesta para su utilización generalizada a nivel regional, sólo representa a aquellos parámetros que permitieron optimizar las salidas de crecimiento y desarrollo de los cultivos para luego verificar la simulación del balance hídrico.

2.8 Evaluación del modelo

Una vez calibrado el modelo a través de la selección de parámetros, se realizó una evaluación del modelo para cuantificar el grado de ajuste entre la simulación y los resultados observados.

Como la selección de parámetros se realizó en base a los resultados del experimento, es lógico esperar que las predicciones sean satisfactorias. Por lo tanto, la evaluación que se realiza sólo tiene por alcance cuantificar el grado de predicción del modelo calibrado a un set de datos que no es independiente.

Un método común para evaluar un modelo consistente en representar los valores observados en contra de los valores simulados y la correlación entre ellos es utilizada para la evaluación del modelo (Kobayashi, y Salam, 2000). Asimismo, otro de los métodos más comúnmente usados para evaluar la exactitud y precisión de los modelos es la raíz de la diferencia de cuadrados media (RMSE), complementados con gráficos 1:1 que permite visualizar la correspondencia entre los valores simulados y los observados.

La RMSE se calcula como:

$$\sqrt{\frac{\sum (\text{valores observados} - \text{valores simulados})^2}{n^{\circ} \text{ de datos}}}$$

Además, se utilizó el Error Medio Relativo (EMR) como segundo evaluador de la performance de CropSyst. El EMR indica la eficiencia en porcentaje con que el modelo estima los resultados. Se calcula como:

$$\text{EMR} = (\text{RMSE} / \text{promedio valores observados}) \times 100$$

2.9 Validación del agua en el suelo

Una vez que se ajustaron todos los parámetros mencionados anteriormente y que el modelo simuló aceptablemente el crecimiento y desarrollo de los cultivos con respecto a los valores observados, se pasó a verificar lo que ocurría en el suelo con el contenido de agua ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y el agua total (mm), utilizando los métodos de infiltración de agua en el suelo en cascada y el de las diferencias finitas.

Se utilizaron como indicadores la RMSE y el EMR.

3. Análisis de sensibilidad

Para conocer la incidencia de los parámetros de entrada del modelo sobre el agua en el suelo y otras variables de importancia, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para los parámetros de curva número, coeficiente de extinción, longitud de raíz por unidad de raíz, densidad de raíces y curvatura de raíz. Estas variables fueron seleccionadas *a priori*, considerando cuales podrían tener un mayor impacto sobre el balance hídrico. De esta manera es posible determinar a qué parámetros se debe dar mayor importancia durante la modelización. Los porcentajes que se tomaron para realizar el análisis referido fueron: un 8 % en más y en menos del valor normal de curva número, un 20 % en más y en menos del valor normal para el coeficiente de extinción, longitud de raíz por unidad de raíz y densidad de raíces, y un 100 % en más y en menos

del valor normal para curvatura de raíz. Se adoptaron como indicadores el rendimiento, la intercepción de radiación máxima, la evapotranspiración, la relación transpiración/evapotranspiración y los valores de RMSE del agua total simulada por los dos métodos de infiltración.

Este análisis solo se realizó para el cultivo de trigo de ciclo largo.

3 Resultados

3.1 Variables de crecimiento y desarrollo.

De acuerdo a lo esperado en base a la naturaleza del proceso de calibración realizado, las predicciones del modelo en cuanto al crecimiento y desarrollo fueron muy buenas con respecto a las observaciones en el experimento.

La comparación de las simulaciones y mediciones de materia seca (MS) tuvo como rango valores de RMSE de 1922 a 306 kg ha⁻¹. Los RMSE fueron en los diferentes cultivos: trigo ciclo largo 990 kg ha⁻¹, trigo ciclo corto 306 kg ha⁻¹, lino 1922 kg ha⁻¹, colza 1020 kg ha⁻¹ y arveja proteica 571 kg ha⁻¹ (Figura 8). De la información se desprende que el modelo ejecutó una mejor simulación en arveja proteica y trigo ciclo corto y en menor medida trigo ciclo largo, colza y lino. Así lo demuestran los valores de error medio relativo (EMR): arveja proteica 9%, trigo ciclo corto 8%, trigo ciclo largo 12%, colza 13% y lino 44%.

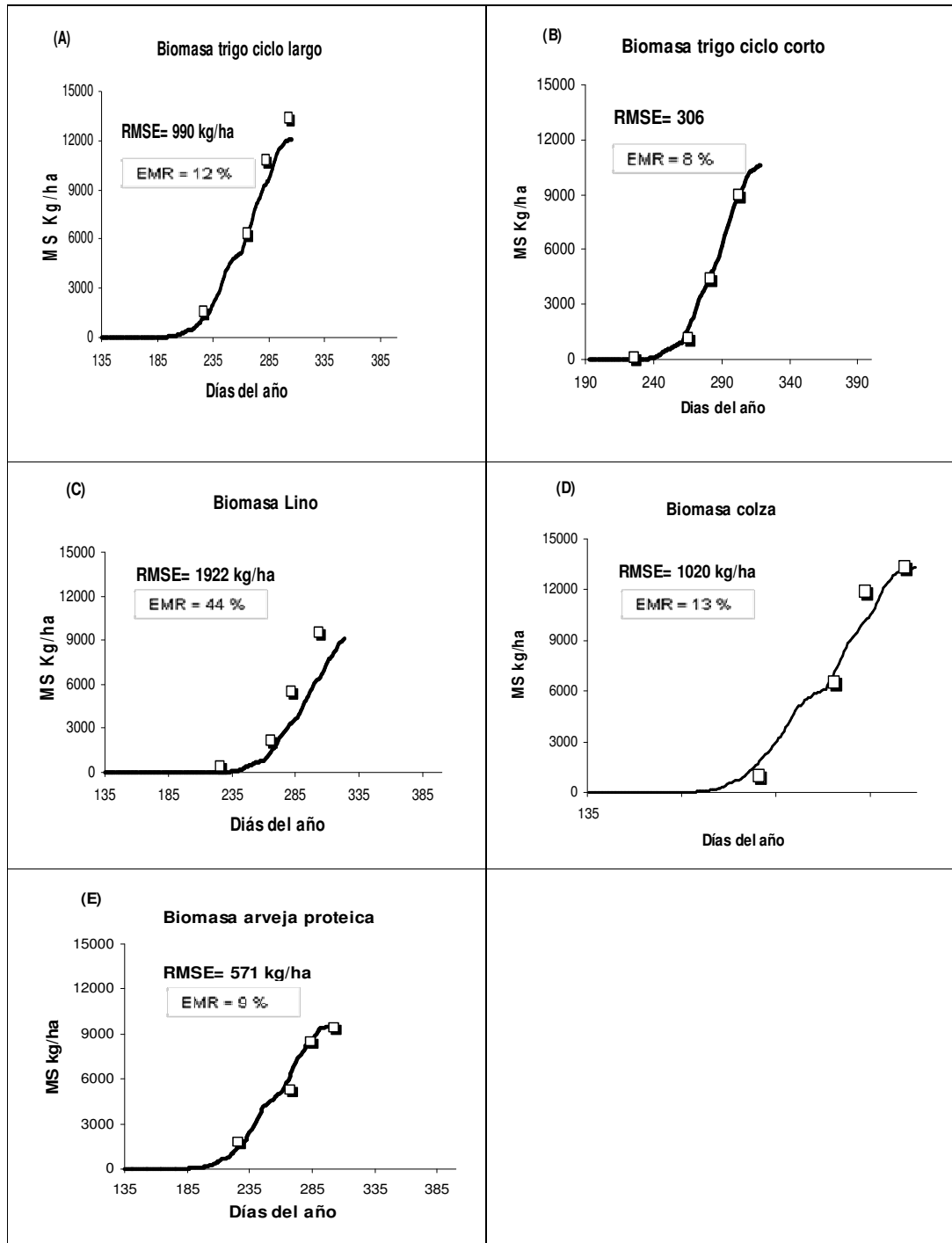


Figura 8. Comparación de materia seca simulada y observada en kg ha^{-1} en las siguientes especies: (A) trigo ciclo largo, (B) trigo ciclo corto, (C) lino, (D) colza y (E) arveja proteica. La línea continua representa los valores simulados y los símbolos (\square) los valores observados. Se menciona el error medio relativo (EMR) hallado para cada cultivo.

En cuanto a la intercepción de la radiación, el modelo efectuó un ajuste correcto en la mayoría de los cultivos en estudio. La RMSE hallada fue: trigo ciclo corto y lino 3%, de trigo ciclo largo 6%, arveja proteica 13% y colza 17% (Figura 9).

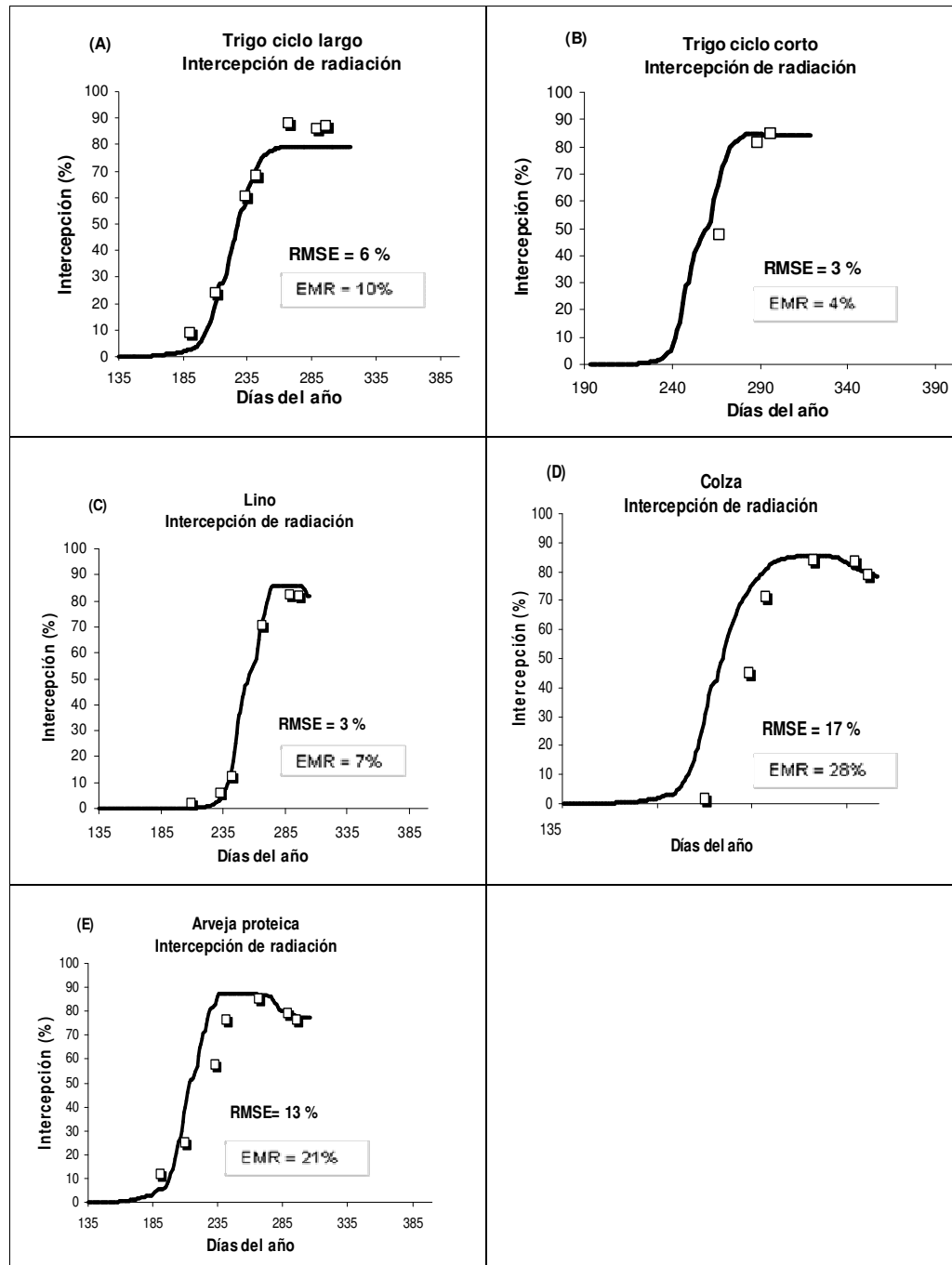


Figura 9: Comparación de intercepción de la radiación simulada y observada en porcentaje en las siguientes especies: (A) trigo ciclo largo, (B) trigo ciclo corto, (C) lino, (D) colza y (E) arveja proteica. La línea continua representa los valores simulados y los símbolos (□) los valores observados. Se menciona el error medio relativo (EMR) hallado para cada cultivo.

Corroborando algunas diferencias en los valores de error medio relativo (EMR) encontrados: trigo ciclo corto 3%, lino 7%, trigo ciclo largo 10%, arveja proteica 21% y colza 28%.

Los rendimientos obtenidos por la simulación fueron semejantes a los observados a campo. El modelo efectuó una buena simulación de los rendimientos en función del gráfico 1:1. El valor de RMSE fue de 261 kg ha⁻¹ para las especies en estudio. En el lino la subestimación del rendimiento fue mayor que en los otros cultivos. El error medio relativo (EMR) fue del 8%.(Figura 10).

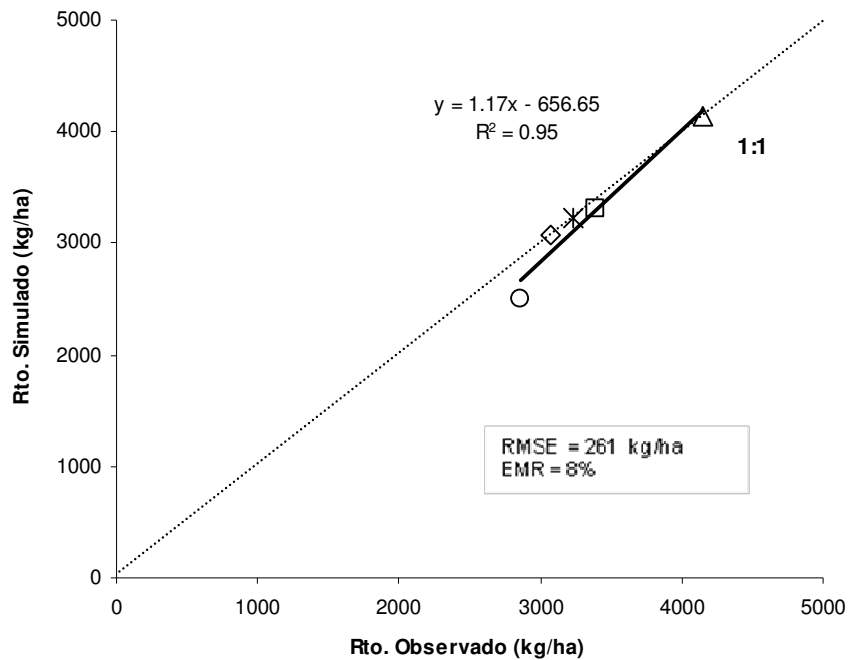


Figura 10. Comparación de rendimientos (kg ha⁻¹) simulados y observados con respecto al gráfico 1:1 en función de las especies: trigo ciclo largo (*), trigo ciclo corto (□), lino (○), colza (◇) y arveja proteica (Δ). Se menciona el error medio relativo (EMR).

3.2 Simulación de agua en el suelo.

Para la simulación del contenido de agua en el suelo se tomaron las observaciones y registro de humedad a 50 cm de profundidad realizadas el 04-09-07 y del 08-10-07, en las cuales estaba comprendido el período crítico para la definición del rendimiento de las especies en estudio (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15).

En las especies analizadas el contenido de agua volumétrica simulada en ambas fechas por los métodos de cascada y diferencias finitas, fue sobreestimado para algunas profundidades y subestimado para otras. En general los valores simulados por ambos métodos no coincidieron con los desvíos para los valores observados. (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15).

El contenido de agua volumétrica en el perfil del suelo el 04-09-07 simulado con los métodos de cascada y diferencias finitas, estuvo en general más seco en los primeros 10 cm de profundidad para todas las especies en estudio, siendo el método de cascada el que simuló menores contenidos de humedad. No obstante, a mayor profundidad, ambos métodos mejoraron las predicciones del contenido de humedad (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15).

Una situación diferente ocurrió el 08-10-07 con ambos métodos, ocasión en la que se simularon contenidos de humedad volumétricas mayores en los primeros 10 cm de profundidad para todos los cultivos. En las restantes profundidades, ambos métodos simularon contenidos de humedad volumétrica bastante similares entre si y más cercanos al rango de valores observados en todo el perfil del suelo (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15).

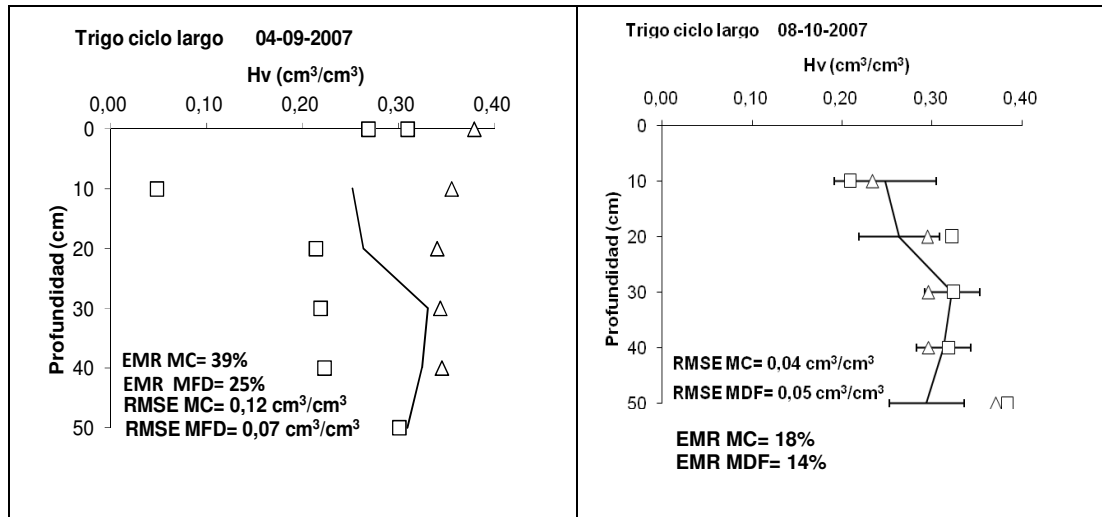


Figura 11. Comparación entre el contenido de agua volumétrica (cm³ cm⁻³) simulado y observado hasta 50 cm de profundidad correspondiente a las fechas: 04-09-07 y 08-10-07 en trigo ciclo largo. Agua simulado por el método en cascada (MC) (□) y el método de diferencia finita (MDF) (Δ). La línea continua representa los valores de agua observados en el ensayo. Las barras sobre los valores observados indican los desvíos con respecto a media. Se presentan los valores de RMSE y EMR para ambos métodos.

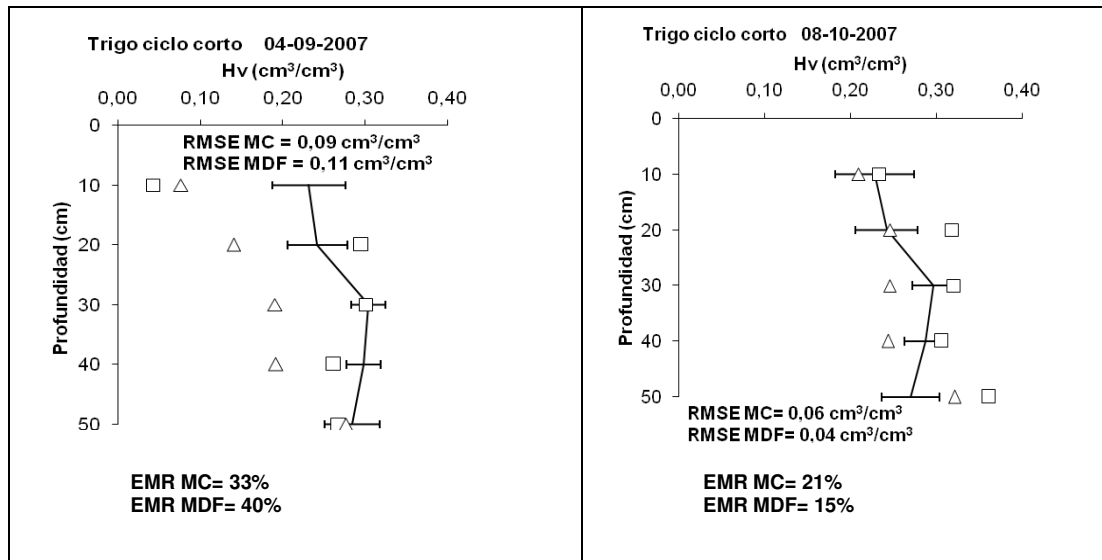


Figura 12. Comparación entre el contenido de agua volumétrica (cm³ cm⁻³) simulado y observado hasta 50 cm de profundidad correspondiente a las fechas: 04-09-07 y 08-10-07 en trigo ciclo corto. Agua simulado por el método en cascada (MC) (□) y el método de diferencia finita (MDF) (Δ). La línea continua representa los valores de agua observados en el ensayo. Las barras sobre los valores observados indican los desvíos con respecto a media. Se presentan los RMSE y EMR para ambos métodos.

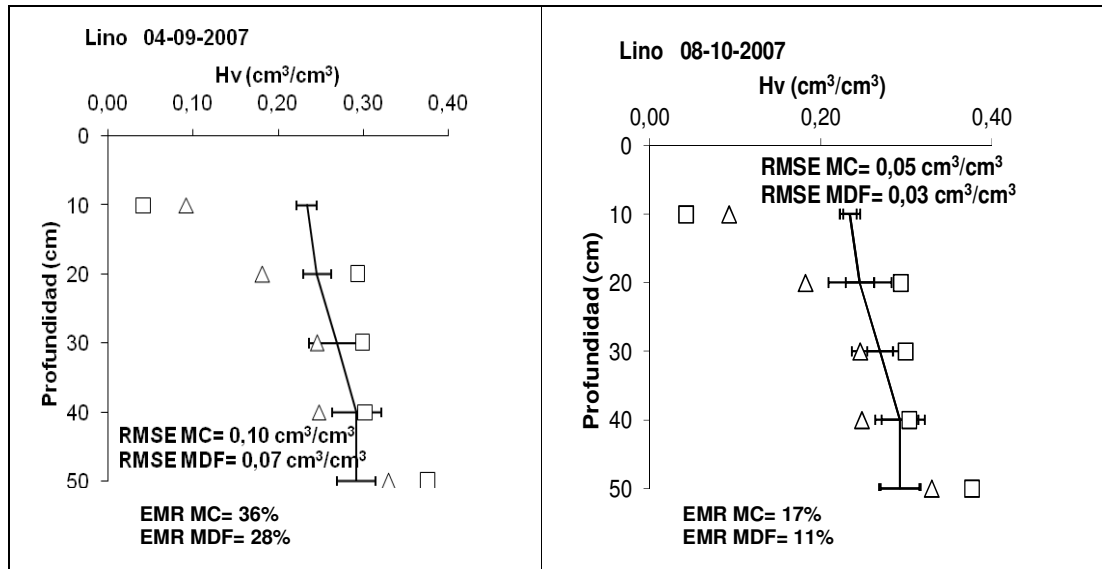


Figura 13. Comparación entre el contenido de agua volumétrica (cm³ cm⁻³) simulado y observado hasta 50 cm de profundidad correspondiente a las fechas: 04-09-07 y 08-10-07 en lino. Agua simulado por el método en cascada (MC) (□) y el método de diferencia finita (MDF) (Δ). La línea continua representa los valores de agua observados en el ensayo. Las barras sobre los valores observados indican los desvíos con respecto a media. Se presentan los valores de RMSE y EMR para ambos métodos.

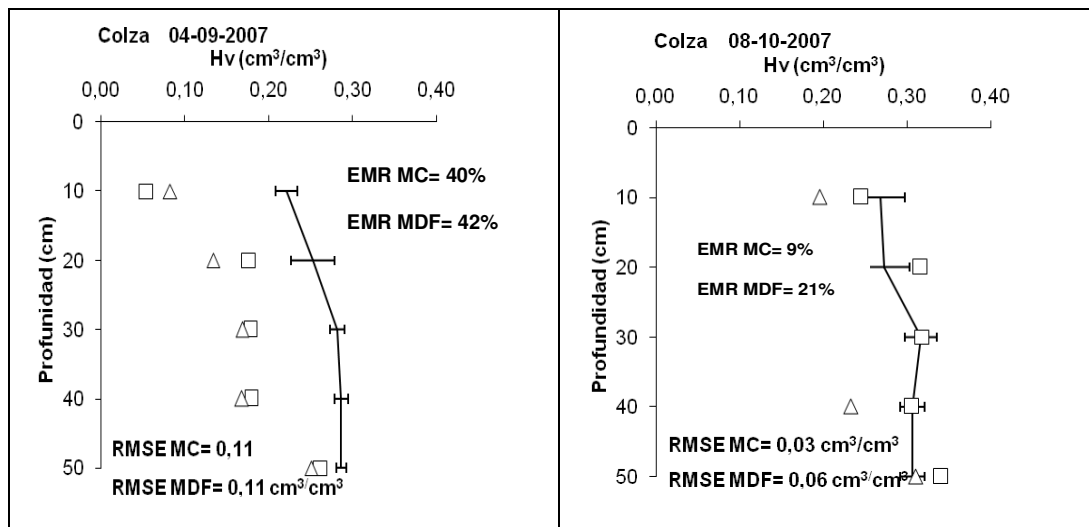


Figura 14. Comparación entre el contenido de agua volumétrica (cm³ cm⁻³) simulado y observado hasta 50 cm de profundidad correspondiente a las fechas: 04-09-07 y 08-10-07 en colza. Agua simulado por el método en cascada (MC) (□) y el método de diferencia finita (MDF) (Δ). La línea continua representa los valores de agua observados en el ensayo. Las barras sobre los valores observados indican los desvíos con respecto a media. Se presentan los valores de RMSE y EMR para ambos métodos.

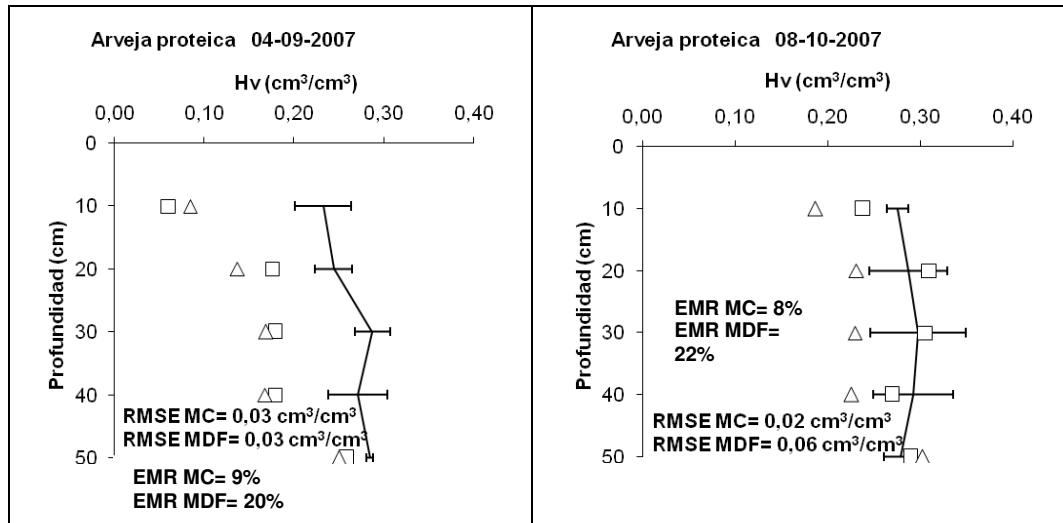


Figura 15. Comparación entre el contenido de agua volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) simulado y observado hasta 50 cm de profundidad correspondiente a las fechas: 04-09-07 y 08-10-07 en arveja proteica. Agua simulado por el método en cascada (MC) (\square) y el método de diferencia finita (MDF) (\triangle). La línea continua representa los valores de agua observados en el ensayo. Las barras sobre los valores observados indican los desvíos con respecto a media. Se presentan los valores de RMSE y EMR para ambos métodos.

Los valores de error medio relativo (EMR) hallados en los diferentes cultivos fueron mayores en la situación 04-09-07 comparado con la situación 08-10-07, para ambos métodos de infiltración del agua en el suelo (Figuras 11, 12, 13, 14 y 15).

En cambio, cuando se analizó el contenido de agua total (AT) en el suelo a 50 cm de profundidad, debido a que las simulaciones por estrato se compensaron cuando se integraron en una mayor profundidad. El método de las diferencias finitas fue el que mejor simuló el agua total en todas las especies, siendo los valores de RMSE en trigo ciclo corto (13 mm), colza (17 mm), arveja (20 mm), lino (29 mm) y trigo ciclo largo (39 mm). Por el contrario, el método en cascada simuló predicciones de agua total con valores de RMSE mayores para todas las especies: trigo ciclo corto (27 mm), colza (32 mm), arveja proteica (37 mm), lino (35 mm) y trigo ciclo largo (39 mm) (Figura 16, 17, 18, 19 y 20). Además, se muestran los valores de agua total para todas las especies observadas y simuladas por ambos métodos de infiltración de agua en el suelo, en relación con el gráfico 1:1 (Figura 21).

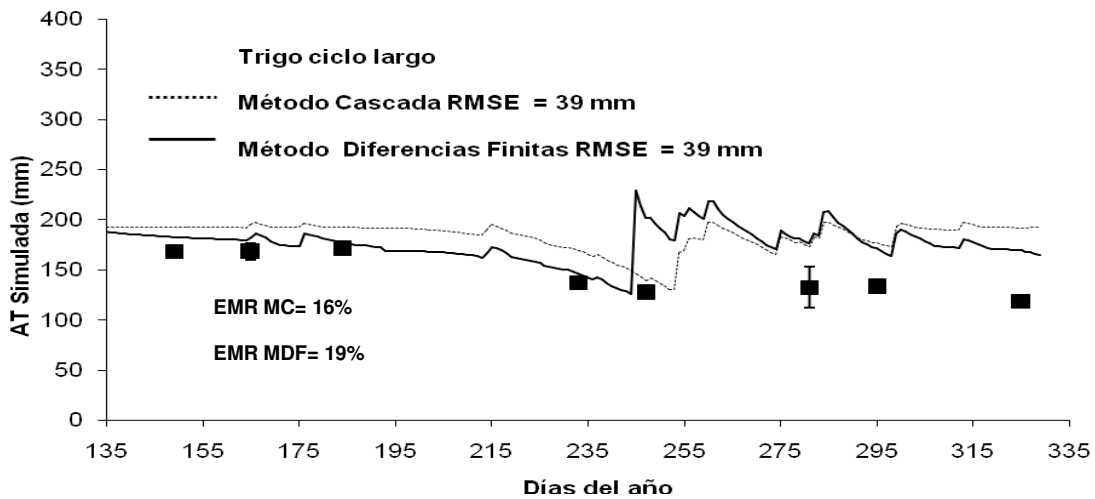


Figura 16. Contenido de agua total (AT) 50 cm profundidad desde la siembra en mm simulado y observado correspondiente al trigo ciclo largo. Los valores observados del agua total (■) y las barras indican los desvíos estándar respecto de la media de los valores observados. La línea punteada es la simulación del AT por método de cascada y la línea continua es la simulación del AT por método de diferencia finita. También se presentan los valores de RMSE y EMR para ambos métodos en mm y en porcentaje respectivamente.

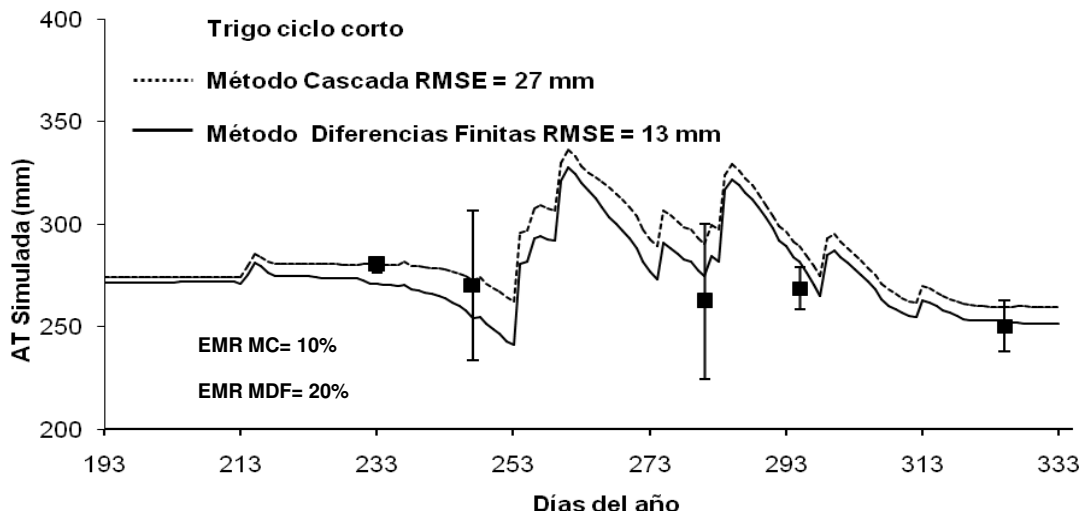


Figura 17. Contenido de agua total (AT) 50 cm profundidad desde la siembra en mm simulado y observado correspondiente al trigo ciclo corto. Los valores observados del agua total (■) y las barras indican los desvíos estándar respecto de la media de los valores observados. La línea punteada es la simulación del AT por método de cascada y la línea continua es la simulación del AT por método de diferencia finita. También se presentan los valores de RMSE y EMR para ambos métodos en mm y en porcentaje respectivamente.

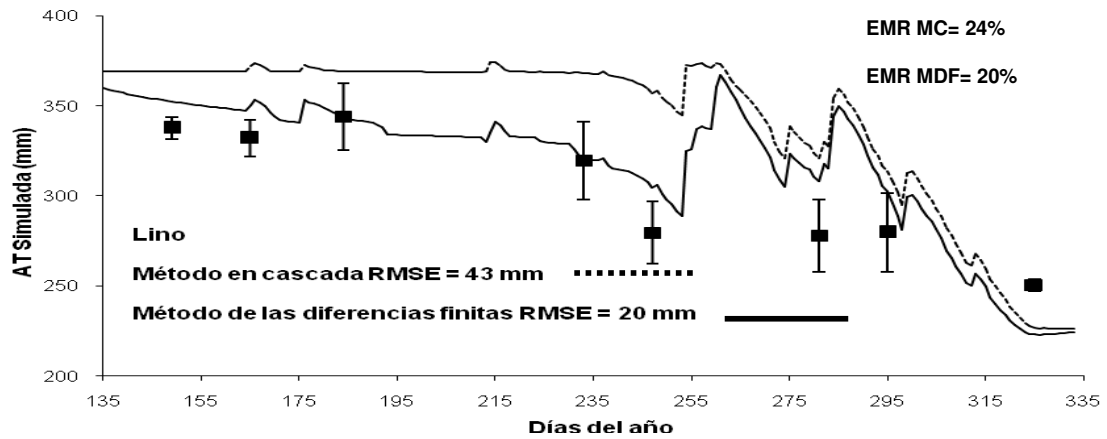


Figura 18. Contenido de agua total (AT) 50 cm profundidad desde la siembra en mm simulado y observado correspondiente al lino. Los valores observados del agua total (■) y las barras indican los desvíos estándar respecto de la media de los valores observados. La línea punteada es la simulación del AT por método de cascada y la línea continua es la simulación del AT por método de diferencia finita. También se presentan los valores de RMSE y EMR (Error Medio Relativo), para ambos métodos en mm y en porcentaje respectivamente.

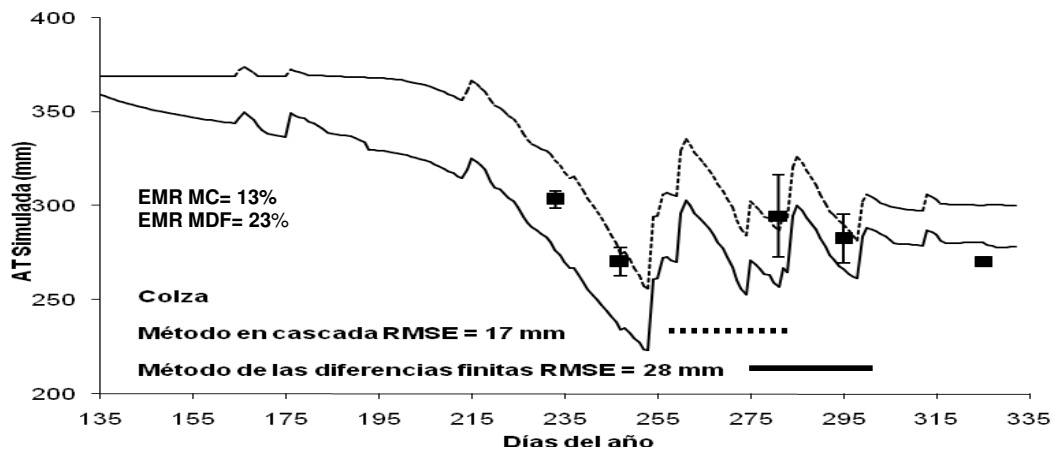


Figura 19. Contenido de agua total (AT) 50 cm profundidad desde la siembra en mm simulado y observado correspondiente a la colza. Los valores observados del agua total (■) y las barras indican los desvíos estándar respecto de la media de los valores observados. La línea punteada es la simulación del AT por método de cascada y la línea continua es la simulación del AT por método de diferencia finita. También se presentan los valores de RMSE y EMR (Error Medio Relativo), para ambos métodos en mm y en porcentaje respectivamente.

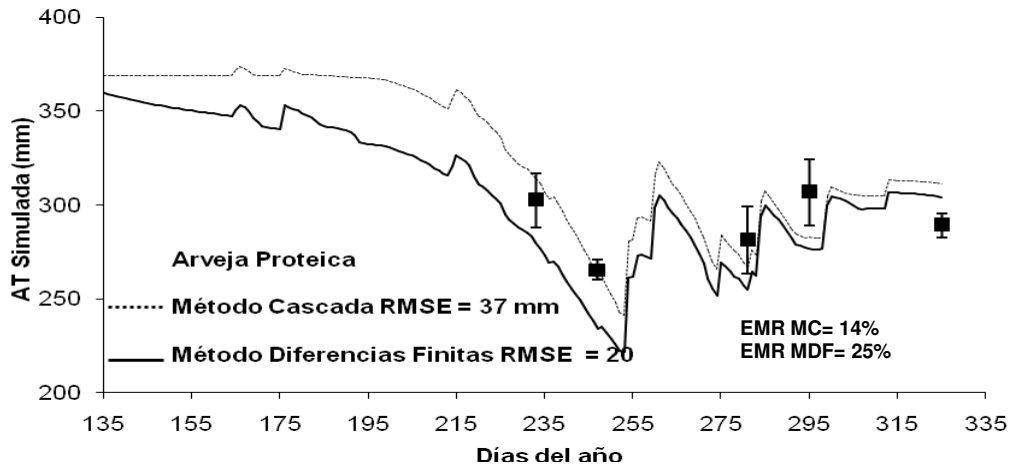


Figura 20. Contenido de agua total (AT) 50 cm profundidad desde la siembra en mm simulado y observado correspondiente a la arveja proteica. Los valores observados agua total (■) y las barras indican los desvíos estándar respecto de la media de los valores observados. La línea punteada es la simulación del AT por método de cascada y la línea continua es la simulación del AT por método de diferencia finita. También se presentan los valores de RMSE y EMR (Error Medio Relativo), para ambos métodos en mm y en porcentaje respectivamente.

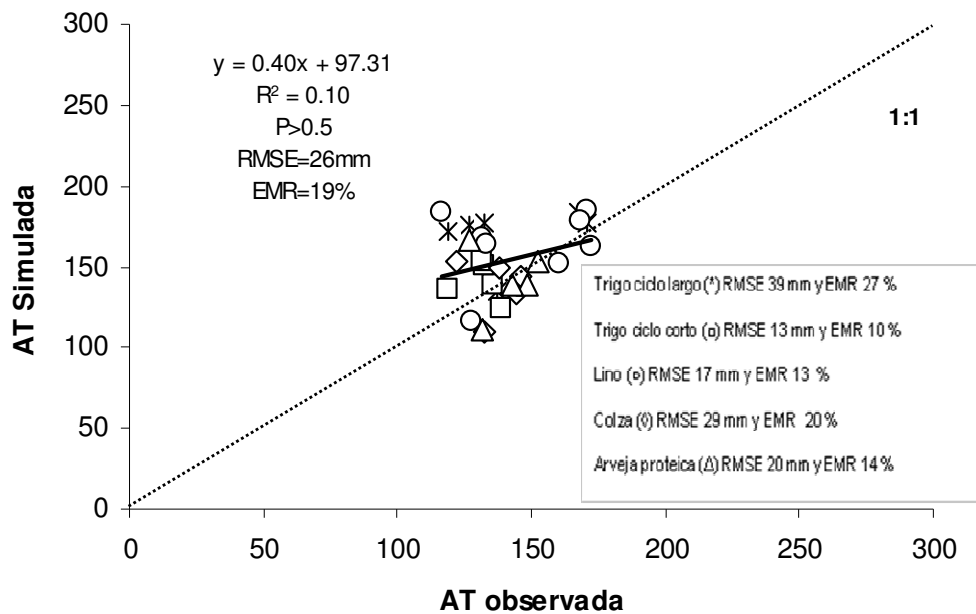


Figura 21. Comparación del agua total (AT) (mm) simulados y observados con respecto al gráfico 1:1 en función de las especies: trigo ciclo largo (*), trigo ciclo corto (□), lino (○), colza (◇) y arveja proteica (Δ). Valores de RMSE y EMR, para cada cultivo.

3.3 Análisis de Sensibilidad.

El análisis de sensibilidad utilizado en trigo ciclo largo con los parámetros de curva número, coeficiente de extinción, longitud de raíz por unidad de raíz, densidad de superficie de raíces y curvatura de raíz, no mostró cambios importantes en los indicadores de rendimiento, interceptación de radiación máxima, evapotranspiración acumulada, relación transpiración/evapotranspiración y los valores de RMSE del agua total simulada por los métodos de cascada y diferencias finitas. Por lo tanto, estos parámetros no demostraron ser importantes en el crecimiento y desarrollo de las especies en estudio, ni afectar la simulación del balance hídrico (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis de sensibilidad para el trigo ciclo largo en los siguientes parámetros: curva número, coeficiente de extinción, longitud de raíz por unidad de raíz, densidad superficie de raíces y curvatura de raíz. Las variables analizadas fueron el rendimiento (Rto), interceptación de radiación máxima (IRmáx), evapotranspiración acumulada (ETacum), relación transpiración/evapotranspiración (T/ET) y los valores de RMSE para el agua total (AT) en 50 cm de profundidad simulados por los métodos en cascada y diferencias finitas. Las celdas de la tabla sin relleno indican las variables de salida del modelo. Las celdas con fondo gris indican los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad, que valores tomó cada uno y que variación hubo en cada parámetro (%).

Parámetro	Unidad	(%)	Valor	Rto. (kg ha ⁻¹)	IR máx (%)	ET acum. (mm)	T/ET	RMSE (mm) AT en 50 cm prof. Método Cascada	RMSE (mm) AT en 50 cm prof. Método Dif. Finitas
Curva número	%	+8	92	3219	88	335	82	36	34
		0	85	3221	88	335	82	37	31
		-8	78	3221	88	335	82	39	43
Coeficiente de extinción (K)	adimen.	+20	0,84	3221	92	351	85	37	31
		0	0,7	3221	88	335	82	37	31
		-20	0,56	2937	79	299	78	39	39
Longitud de raíz por unidad de raíz	km kg ⁻¹	+20	108	3221	88	335	82	39	39
		0	90	3221	88	335	82	37	31
		-20	72	3221	88	335	82	39	39
Densidad superficies raíces	cm cm ⁻¹	+20	3,6	3221	88	338	82	39	39
		0	3	3221	88	335	82	37	31
		-20	2,4	3221	88	338	82	39	39
Curvatura de raíz	adimen.	+100	0,2	3220	88	338	82	38	39
		0	0,1	3221	88	335	82	37	31
		-100	0	3221	88	338	82	39	42

4. Discusión.

La comparación de los resultados experimentales con las simulaciones hechas con CropSyst en este estudio, mostró cierta coincidencia con aquellas simulaciones logradas por Díaz-Ambrona (2005) y Marcos (2000) en cuanto al crecimiento y desarrollo de los cultivos, a pesar de las diferencias lógicas dadas por los ambientes y condiciones experimentales.

Asimismo, se lograron buenas predicciones en el porcentaje de interceptación de la radiación máxima con valores observados en trigo ciclo largo 87 % y ciclo corto 87 %, lino 82 %, colza 89 % y arveja 76%, contra los valores simulados en trigo ciclo largo 79 % y ciclo corto 84%, lino 86%, colza 80% y arveja 78%.

La comparación de la biomasa observada y simulada durante el crecimiento y desarrollo de las especies analizadas, arrojó como resultados de RMSE en trigo ciclo largo 990 kg ha⁻¹, trigo ciclo corto 306 kg ha⁻¹, lino 1922 kg ha⁻¹, colza 1020 kg ha⁻¹ y arveja proteica 571 kg ha⁻¹ (Figura 8). De la manera comparable, Díaz-Ambrona (2005) informaron valores de RMSE en trigo de 880 kg ha⁻¹, mostaza 320 kg ha⁻¹ y arveja 720 kg ha⁻¹.

A pesar que el modelo sobreestimó la radiación interceptada por el cultivo (Figura 9), predijo la producción de biomasa correctamente (Figura 8). Esta situación se debería a que en el modelo el crecimiento del cultivo es calculado como el mínimo del crecimiento limitado por agua y el mínimo de crecimiento limitado por radiación. En la descripción del modelo (sección 2.6) se describió esta particularidad del funcionamiento del mismo.

Con respecto a los rendimientos, en todas las especies se logró un RMSE de 261 kg ha⁻¹. Díaz-Ambrona (2005) informaron resultados de RMSE en trigo de 780 kg ha⁻¹, mostaza 200 kg ha⁻¹ y arveja 290 kg ha⁻¹.

La evaluación del modelo en relación a las variables de desarrollo, crecimiento y rendimiento fue satisfactoria, lo cual no resulta sorprendente ya que el procedimiento de calibración utilizado se basó en los mismos resultados observados contra los que se contrasta el funcionamiento del modelo. En consecuencia, estos resultados sólo deben considerarse como una evaluación del modelo que permite cuantificar el buen grado de ajuste entre valores simulados y observados de las variables de desarrollo, crecimiento y rendimiento, para poder verificar luego la predicción de la humedad en el suelo.

Los variables de eficiencia de conversión de luz solar a biomasa (e) y el coeficiente de transpiración-biomasa (K_{BT}), calculados y utilizados para ajustar y calibrar el

modelo a partir de los datos relevados en el experimento, constituyen los parámetros más importantes del crecimiento y desarrollo de las especies estudiadas. Esto es así porque se trata de datos reales, certeros y por lo tanto fiables para su aplicación en este estudio. Asimismo, cabe destacar los valores encontrados en la investigación de Díaz-Ambrona (2005), Marcos (2000) y el presente trabajo, que se exponen a continuación (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros de coeficiente transpiración-biomasa (K_{BT}) y eficiencia en el uso de radiación solar (e) para simular trigo, lino, Mostaza/Colza y arveja.

Especie	Marcos (2000)		Díaz-Ambrona (2005) et al.		Presente estudio (2007)	
	K_{BT} ¹	e ²	K_{BT}	e	K_{BT}	e
Trigo	5,6	2,2	5,8	3	10,34	2,7
Lino	4,8	2	-	-	5,81	1,65
Mostaza/Colza	4,3	1,8	6	1,85	8,96	2,46
Arveja	4	1,6	3,25	1,47	7,3	2,02

¹ kPa kg⁻¹ m⁻³

² g MJ⁻¹

Los valores de “ e ” encontrados en el presente estudio son similares a los reportados previamente, mientras que los de “ K_{BT} ” son bastante superiores. Esto podría atribuirse, al menos en parte, a las diferencias en la demanda ambiental de los sitios 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 (DPV). Lamentablemente, los trabajos tomados como referencia no brindan la información necesaria para establecer una comparación con respecto al DPV de cada ambiente.

También, los mayores valores de “ K_{BT} ” encontrados en el presente estudio podrían estar asociados a los mayores valores de “ e ” encontrados en los cultivos de colza, arveja y trigo, en comparación con los trabajos de Díaz-Ambrona et al. (2005) y Marcos (2000). Esto sería consistente con las menores diferencias entre el valor encontrado de K_{BT} y los informados para lino. Los vínculos entre ambos parámetros (e y K_{BT}) han sido

informados en diferentes niveles de organización y cultivos (Sadras et al., 1991; Hirose and Bazzaz, 1998; Caviglia and Sadras, 2001).

Debe aclararse que existen muy pocos valores de referencia publicados del parámetro “ K_{BT} ”, ya que usualmente se reporta la eficiencia en el uso del agua en relación al agua evapotranspirada y raramente se hace referencia al DPV (Marcos, 2000). En consecuencia, es muy limitado el alcance de la discusión con respecto a las divergencias entre valores encontrados y reportados.

En relación al balance de agua –objeto principal del trabajo de intensificación-, este estudio evidenció problemas en la simulación del contenido del agua en el perfil del suelo por los métodos de cascada y diferencias finitas. Esto podría atribuirse, al menos en parte, a que el modelo no estima bien las constantes hídricas (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) (Figura 22). Esta cuestión constituye una nueva línea de investigación que debería abordarse para dilucidar en qué grado esta subestimación de constantes hídricas afecta el resultado del balance hídrico estimado por CropSyst.

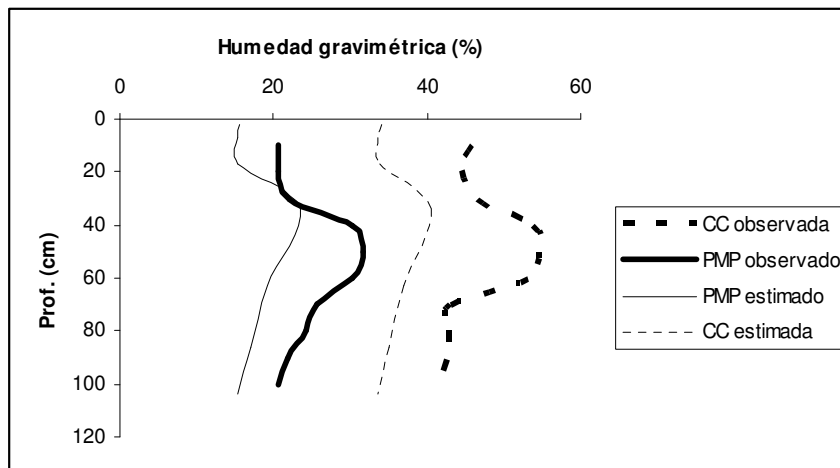


Figura 22. Punto de marchitez permanente (PMP, líneas continuas) y capacidad de campo (CC, líneas punteadas) observadas (trazo grueso) y estimadas (trazo fino) por la función de pedotransferencia de Campbell.

Las diferencias evidentes en cuanto a las constantes hídricas en el suelo pueden explicar parte de las divergencias encontradas en la simulación del contenido de

agua. Así, la subestimación de las constantes hídricas y del rango de agua útil llevaría a que en ambos métodos de infiltración se sobreestime la cantidad de agua que pasa a los horizontes inferiores. Asimismo, los valores de humedad informados por la salida del modelo serán obviamente menores a los observados, debido a que el rango de la simulación es menor al realmente existente. Una posible solución al respecto sería poder incorporar al modelo los valores medidos de las constantes hídricas, lo que no resulta factible con la versión utilizada, la que sólo trabaja con las constantes calculadas en base a la función de pedotransferencia de Campbell.

Los resultados obtenidos del agua total a 50 cm de profundidad mostraron predicciones aceptables, en un rango de RMSE 17 a 43 mm por el método en cascada y un rango de RMSE 13 a 39 mm por el método de diferencias finitas. Se lograron mejores ajustes con el método de las diferencias finitas, debido a que utiliza un equilibrio de flujos que permite que el agua se redistribuya mejor en el perfil del suelo y por lo tanto responde mejor cuando los datos ingresados son más ajustados, en comparación, al método en cascada que es más sencillo y no tan detallado.

Los mejores resultados obtenidos para la simulación de la lámina de agua a 50cm que los obtenidos para humedad del suelo, indican una compensación de los valores de humedad cuando se considera una profundidad del perfil mayor que las de cada capa individual utilizada para evaluar la humedad de suelo. Asimismo, el menor rango de RMSE en la lámina de agua a 50cm estimada por el método de diferencias finitas que por el método de cascada, indica un mejor estimación de la distribución de agua dentro del perfil, lo que resulta lógico si se tiene en cuenta la naturaleza más mecanística de este método en comparación con el método de cascada.

Por otra parte, la mayor lámina de agua a 50cm estimada por el método de cascada en comparación con el de las diferencias finitas (Figuras 16, 17, 18, 19 y 20), en especial en los momentos tempranos del ciclo de los cultivos, estaría indicando la fuerte influencia que tiene el rango de agua disponible sobre el primero de los métodos.

En relación al análisis de sensibilidad, los parámetros evaluados no mostraron cambios significativos en la simulación del agua en el suelo ni en el resto de los indicadores analizados, sugiriendo que mejores ajustes en la predicción del contenido de agua deberían lograrse seleccionando otro tipo de parámetros. La revisión y adaptación de las funciones de pedotransferencia para estimar los límites máximos y mínimos de almacenaje de agua en el suelo probablemente mejoren los resultados obtenidos en este trabajo.

Los parámetros obtenidos sirven de base para efectuar nuevos ajustes del modelo tendientes a generar una validación basada en mayor experimentación a nivel local. Asimismo, los resultados obtenidos pueden resultar útiles para orientar a futuros estudios a seleccionar los parámetros que puedan tener un mayor impacto sobre la simulación del balance hídrico.

5. Conclusiones

Fue posible obtener una calibración de CropSyst que resultó satisfactoria para la mayoría de las variables de crecimiento y desarrollo analizadas.

Las predicciones del contenido de agua en el suelo para cada profundidad resultaron poco satisfactorias. Sin embargo, cuando se consideró la lámina de agua a 50 cm las predicciones fueron más aceptables.

La predicción de la lámina de agua a 50 cm no mejoró sustancialmente cuando se modificaron varios parámetros del modelo como curva número, coeficiente de extinción, longitud de raíz por unidad de raíz, densidad de raíces y curvatura de raíz.

6. Bibliografía

- Abbate P.E. , Dardanelli J.L., Cantarero M.G., Maturano M., Melchiori R.J.M., Suero E.E. 2004.** Climatic and Water Availability Effects on Water-Use Efficiency in Wheat. *Crop Sci.* 44, 474-483.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998.** Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *Irr. Drain. Paper 56.* UN-FAO, Rome. 328pp.
- Bert F. E., Laciana C. E., Podesta G. P., Satorre E. H., Menéndez A. N. 2007.** Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. *Agric. Syst.* 94, 141-150.
- Bert F.E, Satorre E.H., Ruiz Toranzo F., Podestá G.P. 2006.** Climatic information and decisión-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agric. Syst.* 88, 180-204.
- Boote K.J., Jones J.W., Pickering N.B. 1996.** Potencial Uses and Limitations of Crop Models. *Agron. J.* 88, 704-716.
- SIBER. 2006.** Sistema Integrado para el seguimiento y estimación de la producción de cereales y oleaginosas en el territorio entrerriano (SIBER), estadística campaña 2006/07. (Disponible en: <http://www.bolsacer.com.ar> Acceso 3 de marzo de 2011).
- Campbell, G.S. 1985.** Soil Physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems. *Developments in soil science*, 14. Elsevier, Amsterdam. 150 pp.
- Caviglia O.P. 2007.** Intensificación de la secuencia de cultivos en Entre Ríos: balance de carbono y aprovechamiento de recursos. En: Caviglia *et al.*(Eds) *Agricultura sustentable en Entre Ríos.* INTA, Buenos Aires. pp. 149-157
- Caviglia O.P., Sadras V.O., Andrade F.H. 2004.** Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Res.* 87, 117-129.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O. 2001.** Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69, 259-266

- Díaz-Ambrona C.G.H., O'Leary G.J. , Sadras V.O., O'Connell M.G., Connor D.J. 2005.**
Environmental risk analysis of farming systems in a semi-arid environment: effect of rotations and management practices on deep drainage. *Field Crops Res.* 94, 257-271.
- Ferrer M, Villar J.M., Stockle C. 2000.** Evaluación del modelo CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 15, 237-252
- Freer J.B.S. 1991.** A development stage key for linseed (*Linum usitatissimum*) *Aspects of Applied Biology* 28, 33–40.
- Hirose T., Bazzaz F.A. 1998.** Trade-off between light- and nitrogen-use efficiency in canopy photosynthesis. *Ann. Bot.* 82, 195-202.
- INRA-CETIOM. 1988.** Estados vegetativos y reproductivos de la Colza (*Brassica napus*). *Información Técnica CETIOM* 103, 158-175
- Kiniry J.R., Jones C.A., O'Toole J.C., Blanchet R., Cabelguenne M., Spanel D.A. 1989.**
Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain crop species. *Field Crop Res.* 20, 51-64.
- Kobayashi K., Us Salam, M. 2000.** Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92, 345–352.
- Loomis R., Connors D. 1992.** *Crop Ecology: Productivity and Management in Agricultural Systems.* Cambridge University Press, Cambridge. 538 pp.
- Marcos J. 2000.** *Simulation-Based Assessment of alternative Crops in the Dryland Pacific Northwest.* PhD dissertation, Washington State University, Pullman, Washington. 171 pp.
- Mercau J.L., Dardanelli J.L., Collino D.J., Andriani J.M., Irigoyen A., Satorre E.H. 2007.**
Predicting on-farm soybean yield in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Res.* 100, 200-209.
- Monteith J.L. 1965.** *Evaporation and environment.* 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, vol. 19. University Press, Cambridge, pp. 205- 234.

- Pala M., Stöckle C.O., Harris H.C. 1996.** Simulation of Durum Wheat (*Triticum turgidum* ssp. Durum) Growth under Different Water and Nitrogen Regimes in a Mediterranean Environment using CropSyst. Agric. Syst. 51, 147-163
- Priestley C.H.B., Taylor R.J. 1972.** On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Mon. Weath. Rev. 100, 81-92.
- Richardson C. W., Wright D.A. 1984.** WGEN: A model for generating daily weather variables. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research service, ARS 8, 83-87
- Ross P.J., Bristow K.L. 1990.** Simulating water movement in layered and gradational soils using the Kirchhoff transform. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 1519- 1524.
- Sadras V.O., Roget D.K. 2004.** Production and Enviromental Aspects of Cropping Intensification in a Semiarid Environment of Southeastern Australia. Agron. J. 96, 236-246.
- Sadras V.O., Whitfield D.M., Connor D.J. 1991.** Transpiration efficiency in crops of semi-dwarf and standard-height sunflower. Irrig. Sci. 12, 87-91.
- Stöckle C.O., Cabelguenne M., Debaeke P. 1997.** Comparison of CropSyst performance for water management in souhtwestern France using submodels of different levels of clomplexity. Europ. J. Agronomy 7, 89-98.
- Stöckle C.O., Donatelli M, Nelson R. 2003.** CropSyst, a cropping systems simulation model. Europ. J. Agronomy 18, 289-307.
- Stöckle C.O., Jara J. 1998.** Modeling transpiration and soil water content from a corn (*Zea Maize L.*) field: 20 min vs. daytime integration step. Agricultural and Forest Meteorology 92, 119-130.
- Stöckle C.O., Nelson R.L. 1998.** CropSyst User's Manual. Biological Systems Engineering Dept., Pullman, Washington USA, Washington State University. 183 pp.
- Stöckle C.O., Nelson, R.L. 2000.** Cropsyst User's manual (Version 3.0). Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA. 224 pp.

Tanner C.B., Sinclair T.R. 1983. Efficient water use in crop production: research or research? In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), Limitations to efficient water use in crop production. Amer. Soc. Agron, Madison. pp. 1-27

Sinclair T.R., Seligman N. 2000. Criteria for publishing papers on crop modeling. Field Crops Res. 68, 165-172

Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F. 1974. A decimal code for the stages of cereals. Weed Res. 14. 415-421