

VIDELA MENSÉQUE, HOR

Uso del agua en seco

2014

73923



USO DEL AGUA EN SECUENCIAS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS DEL CENTRO - SUR DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

Horacio R. Videla Mensague

Tesis presentada para cumplir con los
requerimientos parciales para optar por el grado de

MAGISTER EN CIENCIAS AGROPECUARIAS
Mención Manejo de Tierras

Escuela de Posgraduación
Facultad de Agronomía y Veterinaria
UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

63233

MFN:	5
Clasif:	

Director: Ing. Agr. Dr. Américo Degioanni
Departamento de Ecología Agraria
Facultad de Agronomía y Veterinaria
Universidad Nacional de Río Cuarto

Co Directora: Ing. Agr. MSc. Elena Bonadeo
Departamento de Ecología Agraria
Facultad de Agronomía y Veterinaria
Universidad Nacional de Río Cuarto

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Certificado de Aprobación

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado Evaluador:

Dr. Octavio Caviglia

Dr. Gabriel Espósito

Dr. Oscar Giayetto



The image shows three handwritten signatures, each written on a horizontal line. The top signature is the most stylized, the middle one is more legible, and the bottom one is also quite stylized.

Fecha de presentación: 10/12/2014

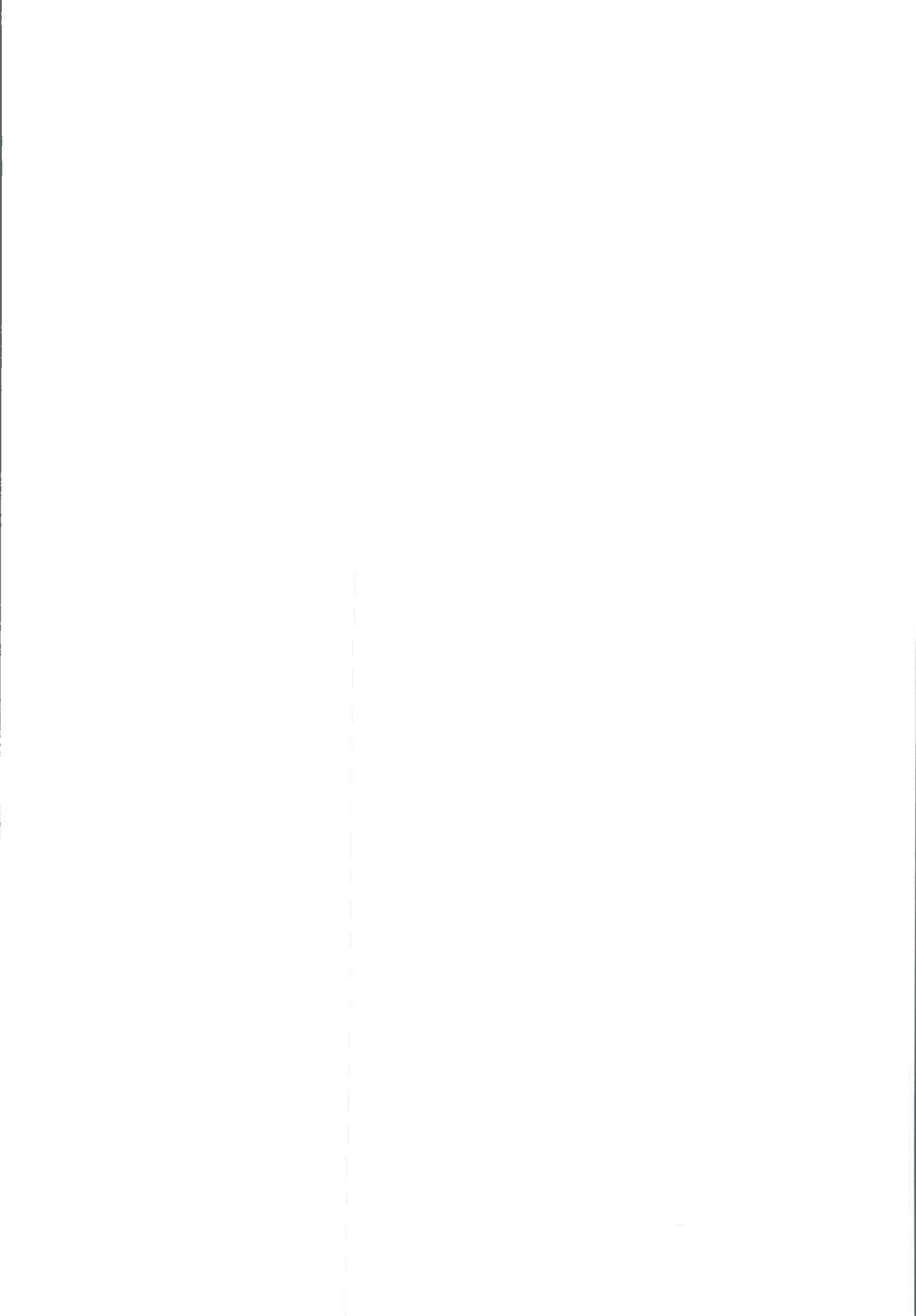
Aprobado por la Secretaría Académica: / /

Secretario Académico

PREFACIO	7
AGRADECIMIENTOS	8
RESUMEN	9
I. INTRODUCCIÓN	10
I.1. USO DEL AGUA EN SECUENCIAS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS DE SECANO	11
I.2. MODELOS DE SIMULACIÓN: UNA HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE LA PA	17
I.3. ÁREA DE ESTUDIO	19
I.4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	22
I.5. ENFOQUE METODOLÓGICO	23
II. MATERIALES Y MÉTODOS	25
II.1. EXPERIMENTO DE CAMPO	25
II.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO	28
<i>II.2.1. BALANCE HÍDRICO</i>	29
<i>II.2.2. DESARROLLO DEL CULTIVO</i>	32
<i>II.2.3. ACUMULACIÓN DE BIOMASA</i>	33
<i>II.2.4. RENDIMIENTO DE GRANO</i>	34
<i>II.2.5. ROTACIÓN DE CULTIVOS</i>	34
II.3. PARAMETRIZACIÓN Y CORROBORACIÓN DEL MODELO	36
<i>II.3.1. PROCESAMIENTO DE DATOS</i>	36
<i>II.3.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO</i>	37
<i>II.3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</i>	38
<i>II.3.4. CORROBORACIÓN DEL MODELO</i>	39
<i>II.3.5. EVALUACIÓN DEL GRADO DE AJUSTE DEL MODELO</i>	40
<i>II.3.6. SUPUESTOS Y LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN</i>	41
II.4. EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL AGUA POR SECUENCIA DE CULTIVOS	41
<i>II.4.1. DISEÑO DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN</i>	41
<i>II.5.2. EVALUACIÓN DEL USO DEL AGUA</i>	43
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
III.1. PARAMETRIZACIÓN Y CORROBORACIÓN DEL MODELO	45
<i>III.1.1. EXPERIMENTO DE CAMPO</i>	46
<i>III.1.2. PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO</i>	49
<i>III.1.3. CALIBRACIÓN</i>	55
<i>III.1.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD</i>	61
<i>III.1.5. CORROBORACIÓN DEL MODELO</i>	63
III.2. USO DEL AGUA EN SECUENCIAS DE CULTIVOS	66
<i>III.2.1. CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE LOS CULTIVOS</i>	66
<i>III.2.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LAS SECUENCIAS DE CULTIVOS</i>	74
<i>III.2.3. CAPTURA DE AGUA DE LAS SECUENCIAS DE CULTIVOS</i>	77
<i>III.2.4. EFICIENCIA DE USO DEL AGUA DE LAS SECUENCIAS DE CULTIVOS</i>	78
<i>III.2.5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DE LAS SECUENCIAS DE CULTIVOS</i>	79



IV. CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS	91
APÉNDICES.....	105
APÉNDICE 1: MODELO DE SIMULACIÓN SWB.....	106
1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>106</i>
2. <i>AMBIENTE ATMOSFÉRICO.....</i>	<i>106</i>
3. <i>BALANCE DE AGUA EN EL SUELO.....</i>	<i>108</i>
4. <i>CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL CULTIVO.....</i>	<i>113</i>
5. <i>BIBLIOGRAFÍA.....</i>	<i>115</i>
APÉNDICE 2: RESUMEN DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE PARÁMETROS DEL MODELO SWB.....	117
APÉNDICE 3: RESUMEN DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS	121
APÉNDICE 4: RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO CLIMGEN.....	125
APÉNDICE 5: DATOS CLIMÁTICOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN DE SWB.....	126
APÉNDICE 6: PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO SWB.....	129
APÉNDICE 7: RESULTADOS DE LA CORROBORACIÓN DEL MODELO SWB	130
ÍNDICE DE FIGURAS.....	132
ÍNDICE DE TABLAS.....	133
SIGLAS Y ABREVIATURAS	135
SUMARY	137



*A mis padres y hermano, quienes alentaron e
inculcaron en mí el camino del esfuerzo y el
conocimiento.*

*A mi esposa, María Teresa, por la
paciencia y el apoyo incondicional
en estos años compartidos.*

Este escrito está organizado siguiendo un orden lógico de un trabajo científico: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusión. En la Introducción se discuten los hallazgos mencionados en la bibliografía sobre la relación entre las secuencias de cultivos agrícolas y el uso del agua, y el uso de modelos de simulación de cultivos como herramientas de análisis para evaluar el uso del agua. También se describen las características productivas y problemáticas ambientales del área de estudio. Además, se define la hipótesis y objetivos. Finalmente, se describe el enfoque metodológico utilizado en la investigación.

En el capítulo 2, Materiales y Métodos, se describe brevemente las condiciones ambientales del área de estudio, características de los ensayos experimentales, la descripción general del modelo de simulación Soil Water Balance (SWB) así como los métodos para la obtención de parámetros genéticos de cultivo, evaluación, corroboración y análisis de sensibilidad del modelo. También se expone la metodología empleada para la evaluación del uso del agua en las secuencias de cultivos.

En el capítulo 3 se presentan los Resultados y Discusión de la investigación. En la primera parte se muestra la parametrización, corroboración, y análisis de sensibilidad de SWB. Específicamente se discute el ajuste del modelo haciendo referencia a: acumulación de biomasa, rendimiento en grano, consumo de agua, y contenido hídrico del suelo. La segunda parte del capítulo, versa sobre los resultados de la evaluación del uso del agua de lluvia de las secuencias de cultivos típicas de la región Centro-Sur de Córdoba. Particularmente, se analiza y discute la relación del uso del agua medido como la captura, eficiencia de uso y productividad del agua en función de la intensificación, diversidad, proporción de gramíneas y maíz de las secuencias de cultivos.

En el último capítulo se detallan las conclusiones halladas y las interrogantes que surgen del estudio así como las posibles líneas de investigación que se desprenden de este estudio. Finalmente, se incluyen varios apéndices que aportan información secundaria o aclaratoria a los capítulos descriptos anteriormente.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este Trabajo desea agradecer la desinteresada colaboración de muchas personas que ayudaron a la realización de esta tesis. Especialmente, quiero destacar el aporte realizado por las siguientes personas e instituciones:

Al movimiento CREA en su conjunto por la posibilidad que me ofrecieron de profundizar mi formación técnica y personal. En especial a Juan Balbín, Carlos Peñafort, Gustavo Martini y a la Mesa de Asesores de la zona Centro. A Fernando Lagos y Carlos Ledesma por su desinteresada colaboración y aporte para realizar los ensayos de campo.

A los docentes y ayudantes de las cátedras de Suelos, Producción de Cereales, y Climatología Agrícola de la Universidad Nacional de Río Cuarto por sus colaboraciones y aportes de información y materiales. Especialmente a la Facultad de Agronomía y Veterinaria por brindarme la posibilidad de concretar los estudios de posgrado y, en particular, al profesor Jorge de Prada por su apoyo.

Al personal de la Agencia de Extensión Rural INTA Laboulaye por su desinteresada colaboración en la realización de ensayos de campo. En especial a Alejandra Canale, Analía Salafia y Paola Blanco.

Al Dr. Javier Marcos por ceder gentilmente el modelo de simulación Soil Water Balance, por su generosa colaboración y el tiempo dedicado a compartir el conocimiento sobre modelación de cultivos.

A Elena Bonadeo por sus sugerencias, correcciones y aliento para concluir este trabajo.

A la empresa Aseagro, y en particular a Mauro Uberto, por haber aportado datos climáticos y de suelos.

A mis compañeros y amigos que ayudaron desinteresadamente.

Finalmente, agradezco a Pocho y Javier por haberme entusiasmado y enseñado el estudio de la agronomía de procesos y del fascinante mundo de los modelos de simulación.

Los sistemas agrícolas con un solo cultivo anual, y en algunos casos monocultivo, como los presentes en la región Centro – Sur de Córdoba - CSC (Argentina), frecuentemente suelen subutilizar el agua de lluvia disponible para la producción de granos. En la región CSC, se realizaron varias investigaciones para evaluar la eficiencia de uso del agua (EUA) para los cultivos tradicionales (soja y maíz, principalmente). Sin embargo, aún se desconoce el grado de aprovechamiento del agua de lluvia de las secuencias de cultivos. El objetivo de esta tesis fue evaluar, mediante el empleo de un modelo de simulación, las secuencias agrícolas que combinan los cultivos típicos de la región CSC y determinar la mejor combinación en intensidad, diversidad, y ordenamiento temporal con el fin de lograr el mejor uso del agua de lluvia. Se adaptó, calibró y corroboró el modelo de simulación *Soil Water Balance* (SWB) para simular las secuencias de cultivos durante un período de 50 años para dos condiciones ambientales en el CSC (Laboulaye y Río Cuarto). Las secuencias de cultivos simuladas incluyen la combinación de los cultivos de trigo (T) (*Triticum aestivum* L.), soja (S) (*Glycine max* [L.] Merr.) y maíz (M) (*Zea mays* L.). Las secuencias de cultivos simuladas (S-S, S-M, T/S-M, T/S-S, T/M-M, T/M-S, y T/S) fueron caracterizadas con el índice de intensificación (IIS), índice de diversidad (ID), proporción de gramíneas (PG) y proporción de maíz (PM) en función de la composición y cantidad de cultivos por unidad de tiempo (años). El grado del aprovechamiento del agua de lluvia por cada secuencia de cultivos fue evaluada por la Productividad del Agua (PA), la cual es producto de la captura de agua (C_{agua}) (relación consumo de agua y la precipitación durante el período de tiempo que se extiende la secuencia -años) y la EUA (relación entre el rendimiento en grano y el consumo de agua de la secuencia). El cambio en el ordenamiento temporal de los cultivos de soja y maíz (e.g. soja de primera o soja de segunda) mostró diferencias en el uso del agua, rendimiento en grano, y EUA. El maíz fue más sensible que soja al ordenamiento temporal afectándose principalmente el consumo de agua y el rendimiento en grano. Soja mostró ser más sensible al ordenamiento temporal en Río Cuarto mientras que maíz lo fue en Laboulaye. A medida que se incrementó la intensidad de la secuencia de cultivos el uso del agua de lluvia mejora ($> PA$) hasta un punto óptimo, por encima de un $IIS > 1,5 \text{ año}^{-1}$ la PA se redujo. Además, la PA estuvo directamente relacionada con el PG y, especialmente con PM. Las secuencias con mayor PA en ambos lugares de estudio fueron T/M-M y T/S-M. La secuencia de cultivos más común en la región CSC (S-S) fue la que menor C_{agua} , EUA y PA mostró. En el largo plazo, las secuencias que mayor PA tuvieron en las condiciones ambientales de la región CSC son las que incluyen tres cultivos cada dos años y tienen un componente de gramíneas importante ($PG \geq 1$ entre trigo y maíz), y en especial maíz. La forma de aumentar esta PA fue incrementando la intensidad de la secuencia y la proporción de gramíneas tendiendo a mejorar la C_{agua} y la EUA. Finalmente, es preciso destacar que los sistemas agrícolas actuales de la región CSC, que evidenciaron un alto predominio de soja, tienen un grado de aprovechamiento del agua muy bajo comparado a otras secuencias ($C_{\text{agua}} < 40\%$).

En las próximas cuatro décadas, se espera que la población mundial se incremente en un tercio y los cambios en los hábitos alimenticios continúen incrementando la demanda de alimentos, fibras y combustibles (FAO, 2002; Bouman, 2007). Las estimaciones realizadas por FAO mencionan que para el año 2050, la demanda global de alimentos provenientes de cultivos agrícolas crecerá aproximadamente un 60% (Penning de Vries *et al.*, 1997). En consecuencia, este incremento de la demanda de alimentos debe ser satisfecho por un aumento de la producción agrícola, principalmente de los rendimientos por unidad de superficie ya que la disponibilidad de tierra para cultivar es limitada.

A su vez, este aumento en la producción de alimentos, fibra y combustibles debe ser logrado en un escenario de cambio climático. El cambio climático puede ocasionar incrementos en la temperatura media, cambios en los patrones de lluvia, incrementos en la variabilidad de los patrones de lluvia y temperatura, cambios en la disponibilidad de agua, la frecuencia y la intensidad de eventos extremos, entre otros. Todos estos cambios en las condiciones climáticas pueden tener grandes consecuencias sobre la agricultura y ocasionar impactos directos e indirectos sobre la producción de alimentos, fibras y combustibles (FAO, 2013).

Una manera de mitigar estos impactos y contribuir a la seguridad alimentaria es diseñar sistemas de producción más eficientes en el uso de los recursos. Actualmente es conocido que uno de los impactos del cambio climático está relacionado a la variabilidad en cantidad y frecuencia de la lluvia. Por consiguiente, la forma en que esta se maneja puede ser una estrategia central para adaptarse al cambio climático (UN-Water, 2010). No obstante, antes de evaluar el impacto potencial del cambio climático es necesario conocer el estado actual del manejo del agua en la agricultura (FAO, 2013).

En la región Centro – Sur de Córdoba - CSC¹ (Argentina), como otras zonas subhúmedas a semiáridas del mundo, el agua es la principal limitante para el rendimiento en grano de los

¹ Por Centro – Sur de Córdoba se entiende la superficie ocupada por los departamentos: Río Cuarto, Juárez Celman, Roque Sáenz Peña y General Roca, y parte de Unión y Marcos Juárez.

cultivos. En estos ambientes, la principal fuente de agua para los cultivos de secano es la lluvia (Dardanelli *et al.*, 2004a). En general, la cantidad de precipitación y su distribución durante el año son suficientes para permitir la producción agrícola de secano. Sin embargo, hay años en que la variabilidad y la frecuencia de precipitación genera déficits o excesos de agua que pueden ocasionar pérdidas importantes en la producción (Solbrig, 2002).

La mayoría de los productores del CSC realizan un solo cultivo por año y, en general, son cultivos de verano (soja y maíz, principalmente). Según De Prada & Penna (2009), el 57% de la superficie agrícola de la región CSC se cultiva con soja y el 28% con maíz; el 15% restante es integrado por trigo, maní, girasol y sorgo. Estos sistemas agrícolas con un solo cultivo anual, y en algunos casos monocultivo, frecuentemente suelen subutilizar el agua de lluvia disponible para el crecimiento de las plantas y la producción de grano (Gregory *et al.*, 2000; Sadras & Roget, 2004) y, además presentan un alto grado de vulnerabilidad ambiental, productiva y económica ante eventos climáticos extremos.

Al presente, es desconocido el grado de aprovechamiento del agua de lluvia que tienen las secuencias de cultivos utilizadas por los productores de la región CSC. Esto plantea la necesidad de evaluar la eficiencia de uso del agua de las secuencias de cultivos actuales y algunas alternativas de mejora en el aprovechamiento del agua de lluvia. Además, la evaluación del uso del agua de las secuencias de cultivos actuales daría un marco de referencia para poder analizar los impactos que podrían ocasionarse sobre la estabilidad de las secuencias de cultivos si ocurren modificaciones en los patrones climáticos. Esta información permitiría aportar herramientas que ayuden a los productores y técnicos a diseñar secuencias de cultivos más eficientes y estables ante condiciones climáticas desfavorables.

1.1. Uso del agua en secuencias de cultivos agrícolas de secano

La acumulación de biomasa y el rendimiento en grano de un cultivo están estrechamente relacionados con la disponibilidad de agua (Passioura, 1996). Esto se debe a que el crecimiento de las plantas requiere la asimilación de dióxido de carbono produciéndose, en el intercambio, la transferencia de agua por transpiración hacia la atmósfera (Sinclair & Bennett, 1998). La cantidad de agua transferida por transpiración está regulada por la atmósfera y es casi continua en el tiempo en condiciones de buena disponibilidad hídrica. Por el contrario, la cantidad de agua disponible, la cual se encuentra en el espacio poroso del suelo, está sujeta a aporte menos continuo y se dan por

la lluvia, riego y/o capa freática. En consecuencia, para que las plantas crezcan óptimamente debe existir un equilibrio entre la disponibilidad y la demanda de agua.

El estudio del equilibrio entre la disponibilidad y la demanda de agua se puede abordar a través del análisis del balance hidrológico (Calera Belmonte, 2005). Desde un punto de vista conceptual, el balance hidrológico en el continuo suelo-planta-atmósfera puede ser pensado como un sistema con entradas y salidas. Las entradas de agua al sistema incluyen: lluvias, riego, escurrimiento directo y subsuperficial entrante, y ascenso capilar. Las salidas comprenden: transpiración, evaporación desde la superficie del suelo y de superficies húmedas de la planta, escurrimiento directo y subsuperficial saliente, y drenaje profundo por debajo de la zona radical. Desde el punto de vista agronómico, el agua que no sale del sistema vía transpiración es un derroche del recurso hídrico. La evaporación y escurrimiento remueven agua del sistema antes que la planta la pueda aprovechar mientras que el drenaje remueve agua por debajo de la profundidad de raíces. No obstante, esta agua puede ser aprovechada en algunas situaciones donde el nivel freático está próximo a la zona enraizable.

Lo antes expuesto remarca la importancia que tiene para la agricultura el estudio de los componentes del balance hidrológico y su relación con el crecimiento de las plantas. A su vez, el análisis de los componentes del balance hidrológico requiere la definición de un dominio limitado en espacio y tiempo (Molden *et al.*, 2003; Bouman, 2007). En este estudio, es de interés analizar la relación de los componentes del balance hidrológico con el rendimiento de los cultivos agrícolas enmarcados en un dominio espacial a escala de lote y temporal representado por una secuencia de cultivos.

Existe un sinnúmero de trabajos científicos que analizan el uso del agua y su eficiencia de uso por los cultivos agrícolas realizados en distintos lugares del mundo (Varvel, 1995; Wallace, 2000; Angus & van Herwaarden, 2001; Bennie & Hensley, 2001; Singh *et al.*, 2006). La mayoría de estas investigaciones fueron focalizadas en analizar el uso del agua por un cultivo en particular teniendo como dominio temporal el ciclo de crecimiento del cultivo. Por lo general, en la mayoría de los trabajos recopilados, el indicador utilizado para evaluar el uso del agua es la Eficiencia de Uso del Agua (EUA). Ésta se define como el rendimiento en grano (o semilla) por cantidad de agua usada en diferentes procesos, principalmente transpiración y evaporación (Wallace & Batchelor, 1997; Molden *et al.*, 2003; Zwart & Bastiaanssen, 2004; Singh *et al.*, 2006).

Las Tabla 1, 2, y 3 muestran un resumen de la revisión de varios trabajos científicos que evaluaron la EUA para los cultivos de trigo, soja y maíz, respectivamente. En trigo el valor medio de EUA encontrado en la bibliografía es $10,5 (\pm 3) \text{ g mm}^{-1}$ con un valor máximo de $17,5 \text{ g mm}^{-1}$

(Srivastava & Sidique, 1978) y un mínimo de 5,4 g mm⁻¹ (Deibert *et al.*, 1986). El valor de EUA de soja promedio es de 5,4 (± 1,8) g mm⁻¹ con un máximo de 7,4 g mm⁻¹ (Dardanelli *et al.*, 1991) y un mínimo de 2,5 g mm⁻¹ (Clawson *et al.*, 1986). En el caso de maíz, la EUA promedio fue de 15,6 (± 6,4) g mm⁻¹ con un máximo de 29,2 g mm⁻¹ (Kang *et al.*, 2000) y un mínimo de 5,3 g mm⁻¹ (Eck & Winter, 1992).

Tabla 1. Recopilación bibliográfica de valores de Eficiencia de Uso del Agua (EUA) de trigo.

Fuente	Lugar	EUA		
		Mínimo	Máximo	Promedio
			g m ⁻² mm ⁻¹	
Abbate <i>et al.</i> (2004)	Balcarce, Argentina	6,1	8,7	7,4
Al-Kaisi <i>et al.</i> (1997)	Yellow Jacket (CO), USA	4,7	10,8	7,7
Amir <i>et al.</i> (1991)	Gilat, Israel	6,0	16,0	8,5
Angus <i>et al.</i> (1991)	Barellan			14,0
Bandyopadhyay & Mallick (2003)	West Bengal, India	11,1	12,9	11,9
Barracough <i>et al.</i> (1989)	Rothamsted, UK	8,0	10,5	9,2
Caviglia & Sadras (2001)	Parana, Argentina	5,5	14,9	10,4
Deibert <i>et al.</i> (1986)	Minot, ND	5,3	5,5	5,4
Deibert <i>et al.</i> (1986)	Minot, ND	5,8	9,0	7,4
Deju & Jingwen (1993)	Quzhou, China	13,8	19,5	15,8
Fengrui <i>et al.</i> (2000)	Xifeng, China	6,5	12,1	8,4
Hussain <i>et al.</i> (2003)	Haryana			13,6
Kamilov <i>et al.</i> (2002)	Tashkent, Uzbekistan	4,4	10,2	7,3
Kirkegaard <i>et al.</i> (1996)	Dirnaseer			10,1
Kirkegaard <i>et al.</i> (1996)	Junee			9,1
Kirkegaard <i>et al.</i> (1996)	Temora			10,7
Kirkegaard <i>et al.</i> (1996)	Pucawan			14,1
Li <i>et al.</i> (2001)	Gansu, China	5,8	14,5	10,0
Mishra <i>et al.</i> (1995)	Pantnagar, India	8,6	13,1	11,1
Oweis <i>et al.</i> (2000)	Tel Hadya, Syria	4,8	11,0	7,8
Pandey <i>et al.</i> (2001)	Konni, Niger	4,2	9,3	6,1
Rahman <i>et al.</i> (1995)	Benerpota, Bangladesh	5,2	13,4	9,1
Regan <i>et al.</i> (1997)	Merredin y Mullewa, Australia	5,5	16,5	8,8
Rockström <i>et al.</i> (1999)	Clima templado	6,3	18,5	10,0
Sezen & Yazar (1996)	Cukurova, Turkey	13,3	14,5	13,9
Sharma <i>et al.</i> (1990)	Karnal, India	2,7	8,2	6,7
Sharma <i>et al.</i> (2001)	Uttar Pradesh, India	4,8	7,1	6,4
Siddique <i>et al.</i> (1990)	Merredin, Australia	5,6	11,4	9,5
Singh & Chauhan (1996)	Pantnagar, India	10,6	12,3	11,0
Singh <i>et al.</i> (2006)	Sirsa, India			13,9
Srivastava & Sidique (1978)	India	16,7	18,3	17,5
Tanaka (1990)	Sidney, MT	6,6	9,1	7,8
Tompkins <i>et al.</i> (1991)	Saskatchewan	9,3	10,3	9,8
van Herwaarden <i>et al.</i> (1996)	Pucawan			13,4
van Herwaarden <i>et al.</i> (1998)	Wagga Wagga			9,7
Waheed <i>et al.</i> (1999)	Faisalabad, Pakistan	7,0	21,9	12,8
Wang <i>et al.</i> (2001)	Luancheng, China	10,7	12,9	12,6
Xianqun (1996)	Yucheng, China	8,8	11,6	10,4
Zhang <i>et al.</i> (1998a)	Beijing, China	9,2	15,5	11,9
Zhang <i>et al.</i> (1999)	Varias localidades, China	8,5	18,6	11,7
Zhang <i>et al.</i> (2003)	Luancheng, China	12,8	18,2	16,3

En comparación con lo mencionado en los párrafos anteriores, los trabajos científicos que estudian el uso del agua en secuencia de cultivos son pocos comparados con los que lo hacen para un cultivo en particular. Otra diferencia hallada entre tipos de trabajos es la forma de evaluar el uso del agua y la aparición, en el estudio de la secuencia de cultivos, de otras variables de análisis relacionadas con el dominio temporal y espacial.

Tabla 2. Recopilación bibliográfica de valores de Eficiencia de Uso del Agua (EUA) de soja.

Fuente	Lugar	Mínimo	EUA	
			Máximo	Promedio
		g m ⁻² mm ⁻¹		
Caviglia <i>et al.</i> (2004)	Balcarce, Argentina	4,3	4,7	4,5
Clawson <i>et al.</i> (1986)		-	-	2,5
Dardanelli <i>et al.</i> (1991)	Balcarce, Argentina	6,0	8,7	7,3
Norwood (1999)	Garden City, KS	2,3	3,5	2,9
Rockström <i>et al.</i> (1999)	Clima tropical	5,1	8,0	6,2
Salado Navarro (2007)	Oliveros, Argentina	6,4	7,6	7,0
Salado Navarro <i>et al.</i> (2006)	Marcos Juárez, Argentina	-	-	7,3
Salado Navarro <i>et al.</i> (2006)	Oliveros, Argentina	-	-	7,3
Salado Navarro <i>et al.</i> (2006)	Pergamino, Argentina	-	-	6,8
Tanner & Sinclair (1983)		-	-	4,0
Timmons <i>et al.</i> (1967)		5,0	6,0	5,5
Varvel (1995)	Nebraska, USA	2,5	4,5	3,5

Cuando se estudia el uso del agua en secuencias de cultivos, el cambio en el dominio temporal origina que deban ser tenidos en cuenta otros factores para la evaluación de la misma. En consecuencia, el término de EUA pasa a tener un sentido más amplio y debe integrar no sólo la relación entre el rendimiento en grano y el agua usada durante la estación de crecimiento de un cultivo sino también evaluar la dinámica de la misma en los períodos entre cultivos. De esta forma, la EUA pasa a denominarse Productividad del Agua (PA) y puede ser evaluada como el producto de dos factores: i) captura de agua y ii) eficiencia de uso del agua; ambos factores medidos en un período de tiempo anual (Caviglia *et al.*, 2004).

El término de captura de agua es una relación entre el agua evapotranspirada y la oferta de agua de lluvia mientras que la eficiencia de uso del agua es la relación entre el rendimiento en grano producido por unidad de agua evapotranspirada. Ambos términos son medidas de eficiencia de utilización de un recurso que se integran para dar un valor general de uso de agua denominado Productividad del Agua. En el caso de la captura de agua busca evaluar el grado de

aprovechamiento del agua de lluvia durante el período de duración de la secuencia y está relacionado con las características de la misma. En cambio la EUA es una medida de la eficiencia de transformación del agua usada por los cultivos en producto cosechable siendo más vinculada a las características eco-fisiológicas de los mismos.

Tabla 3. Recopilación bibliográfica de valores de Eficiencia de Uso del Agua (EUA) de maíz.

Fuente	Lugar	EUA		
		Mínimo	Máximo	Promedio
		g m ⁻² mm ⁻¹		
Bennie & Hansley (2001)	Sur África			7,1
Bennie & Hansley (2001)	Sur África			8,9
Bennie & Hansley (2001)	Sur África			8,7
Bennie & Hansley (2001)	Sur África			9,8
Cracium & Cracium (1999)	Fundulea, Romania	23,4	28,8	26,4
Eck & Winter (1992)	Bushland, TX	2,4	8,1	5,2
Evet <i>et al.</i> (1996)	Bushland (TX), USA	11,2	13,9	13,1
Fengrui <i>et al.</i> (2000)	Xifeng, China	12,6	23,1	20,0
Fernández <i>et al.</i> (1996)	Sevilla, España	15	21,6	17,3
Gencoglan & Yazar (1999)	Cukurova, Turkey	2,2	12,5	10,1
Howell <i>et al.</i> (1995)	Bushland (TX), USA	8,9	15,5	14,2
Howell <i>et al.</i> (1996)	Bushland (TX), USA	14,7	17,4	16,0
Howell <i>et al.</i> (1998)	Bushland, TX	15,2	15,7	15,4
Jin <i>et al.</i> (1999)	Wangtong, China	14,9	26,7	22,3
Kang <i>et al.</i> (2000a)	Changwu, China	21,1	33,7	25,6
Kang <i>et al.</i> (2000b)	Provincia de Gansu, China	21,4	39,9	29,2
Karam <i>et al.</i> (2003)	Tal Amara, Lebanon	13,6	18,9	16,4
Liang <i>et al.</i> (1991)	Quebec			10,2
Libardi <i>et al.</i> (1999)	Guaira, Brazil	11,2	13,3	12,1
Liu & Li (1995)	Changwu, China	13,6	16,5	15,6
Mishra <i>et al.</i> (2001)	Pantnagar, India	11,7	17,4	14,7
Navarro Dujmovich <i>et al.</i> (1996)	Azul, Argentina	18,4	27,9	23,5
Norwood (1999)	Garden City, KS	3	18,9	11,0
Norwood (2000)	Garden City (KS), USA	8,3	16,1	12,6
Oktem <i>et al.</i> (2003)	Harran plain, Turkey	10,4	13,8	12,4
Rockström <i>et al.</i> (1999)	Clima tropical	6,8	10,6	8,7
Roygard <i>et al.</i> (2002)	Blacksburg (VA), USA	13,7	36,4	25,1
Sadler <i>et al.</i> (2000)	Carolina Bays (SC), USA	3,6	15,7	6,5
Steele <i>et al.</i> (1994)	Oakes (ND), USA	20,3	28,6	25,5
Tolk <i>et al.</i> (1998)	Bushland, TX	10,5	16,3	13,4
Tolk <i>et al.</i> (1999)	Bushland (TX), USA	12,6	15,4	14,2
Valvel (1994)	Mead, NE	5,8	16,5	11,1
Wagger & Cassel (1993)	Carolina del Norte, USA	21,7	27,7	24,7
Xianqun (1996)	Yucheng, China	16,3	22,2	19,0
Yazar <i>et al.</i> (1999)	Bushland (TX), USA	11,3	16,8	14,8
Yazar <i>et al.</i> (2002)	Harran plain, Turkey	19,4	22,5	20,2
Zhang <i>et al.</i> (2003)	Luancheng, China	15,5	18,4	16,7
Zima Szalokine & Szaloki (2002)	Szarvas, Hungary	12,8	24,4	18,5

Las variables relacionadas al dominio temporal y espacial encontradas en los estudios de las secuencias de cultivos son: a) intensidad, b) diversidad; y c) ordenamiento temporal. La

intensidad de una secuencia hace referencia al número de cultivos realizados por unidad de tiempo mientras que la diversidad se refiere a la cantidad de cultivos diferentes realizados por unidad de tiempo. El ordenamiento temporal indica cómo se organizan temporalmente los cultivos en una secuencia.

Con respecto a la intensificación de la secuencia de cultivos, varios autores reportaron mejoras en el uso del agua de lluvia cuando se realizan secuencias más intensas (Langdale & Wilson, 1987; Aase & Reitz, 1989). Por ejemplo, en el sudeste de Australia, Sadras & Roget (2004) informaron que puede mejorarse el uso del agua de lluvia por la intensificación de la secuencia de cultivos. Farahani *et al.* (1998), en el sudeste de las grandes planicies de USA, mencionan que intensificando la rotación por medio de la inclusión de cultivos de verano puede incrementarse el uso del agua de lluvia en comparación a secuencias trigo-barbecho. En Dakota del Norte, Black & Bauer (1990) reportaron una mayor producción de grano en secuencias más intensas y mayor respuesta a la fertilización en comparación con sistemas trigo-barbecho (aproximadamente 10% de aumento de rendimiento en grano con manejo de siembra directa o mínima labranza, comparado con labranza convencional, en sistemas de cultivos intensivos).

Nielsen *et al.* (2005) probaron un gran número de secuencias de variada intensidad en Akron (CO, USA) y evaluaron el uso del agua de lluvia. Estos autores concluyen que el uso del agua de lluvia se incrementa cuando la intensidad de la secuencia aumenta de un cultivo cada 2 años a 2 en tres años. Caviglia *et al.* (2004) informaron que la intensificación de la secuencia, en sistemas agrícolas del sudeste de la región pampeana argentina, de un cultivo por año a dos por año, incluyendo un doble cultivo anual (e.g. trigo-soja) puede incrementar marcadamente el uso del agua de lluvia. En general, los experimentos de campo indican que un sistema de cultivo intensificado puede mejorar el rendimiento y los beneficios por unidad de tiempo y superficie de tierra, mejorar la estabilidad de rendimiento e incrementar la cantidad de residuos (Fukai, 1993; Caviglia & Sadras, 2004).

Por otro lado, el aumento de la diversidad de cultivos es otra estrategia para mejorar la utilización del agua de lluvia en una secuencia. Tanaka *et al.* (2005) mencionan que el aumento de la diversidad, sumado a la disminución del tiempo de barbecho, puede ser una estrategia para mejorar el uso del agua de lluvia en secano. Parte de esta mejora en el uso del agua se debe a que la diversidad de cultivos en las secuencias incrementan el rendimiento en comparación a las monoculturas (Porter *et al.*, 1997). Por ejemplo en una secuencia soja – maíz, ambos cultivos rinden entre 15 a 20% más grano en comparación con su propio monocultivo (Crookston, 1995).

Asimismo, el orden de alternancia de los cultivos podría tener efectos sobre el uso del agua de lluvia. Una serie de estudios fueron realizados en Minnesota para identificar interacciones entre cultivos en la rotación soja – maíz. En dichos estudios hallaron que cuando la soja precede al maíz, este generó plantas más grandes y consumió más agua para incrementar el rendimiento en grano en comparación a una secuencia maíz - maíz (Crookston *et al.*, 1991; Copeland *et al.*, 1993). Por el contrario, cuando soja se siembra luego de maíz usó la misma cantidad de agua, que una soja en monocultivo, pero tuvo un rendimiento en grano hasta un 15% mayor. En consecuencia, la EUA de soja se incrementó si el antecesor es maíz comparado con el antecesor soja, mientras que la EUA de maíz no fue afectada por el cultivo previo. De esta manera, el maíz responde a la rotación con un incremento en el consumo de agua para aumentar el rendimiento mientras que soja incrementa la EUA al generar más granos con el mismo consumo de agua (Anderson, 2005a).

El diseño de la secuencia de cultivo afecta el uso del agua de lluvia a través de la modificación del ambiente explorado por los cultivos: radiación solar, temperatura y agua principalmente (Maddonni & de la Fuente, 2004). Pikul & Aase (1995) mencionan que la secuencia de cultivo puede afectar la disponibilidad de agua para el crecimiento de los mismos por cambiar la tasa de infiltración y evaporación del suelo. Estos autores corroboraron que el aumento de la cobertura de residuos sobre el suelo tiene un efecto positivo sobre el balance hídrico. Mantener altos niveles de cobertura conduce a una menor temperatura superficial del suelo y, por consiguiente, una menor tasa de evaporación (Campbell & Norman, 1998; Sinclair & Bennett, 1998). Por otra parte, los rastrojos mejoran la condición superficial del suelo permitiendo una mayor tasa de infiltración (Gil, 2004; Álvarez & Barraco, 2005).

I.2. Modelos de simulación: una herramienta de análisis de la PA

La realización de experimentos de campo para evaluar el uso del agua de lluvia en secuencias de cultivos es un trabajo arduo y complejo de realizar por razones económicas y de tiempo. Sin embargo, la evaluación del uso del agua en secuencias de cultivos a través de la implementación de modelos de simulación puede ser una alternativa menos compleja. Varios trabajos científicos utilizaron modelos de simulación para el estudio de aspectos relacionados con la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera y el análisis de la eficiencia de uso del agua (Stockle *et al.*, 1997; Ferrer & Stockle, 1999; Bellocchi *et al.*, 2002; Sinclair *et al.*, 2007). En este sentido, los modelos de simulación pueden ser usados para predecir cambios y detectar tendencias en indicadores biofísicos tales como el rendimiento en grano, absorción de agua y nitrógeno, nivel de

carbono de suelo, y lixiviación de nitrógeno. De esta manera las prácticas de manejo que son potencialmente sostenibles o insostenibles pueden ser identificadas (Baumhardt *et al.*, 2004).

Los modelos de simulación de cultivos que pueden emplearse para estudiar el uso del agua en secuencias de cultivos son pocos (Parton *et al.*, 1987; Stockle *et al.*, 2003; Friedman, 2004; Robinson *et al.*, 2004). Singh & Thornton (1998) compararon sistemas de maíz continuo con aplicación de fertilizante nitrogenado versus rotación maíz-soja sin aplicación de fertilizante nitrogenado en Florida utilizando el paquete de modelos de DSSAT v3 (Jones *et al.*, 2003). Parton *et al.* (1987) y Tiftonell (2004) analizaron la dinámica de carbono del suelo y el *pool* de nitrógeno con el modelo CENTURY. Donatelli *et al.* (2002) y Díaz-Ambrona *et al.* (1991) evaluaron la capacidad de CropSyst para simular rotaciones de cultivos en Italia y Australia, respectivamente.

En este estudio se utilizará el modelo de simulación *Soil Water Balance* – SWB (Marcos & Campbell, 2002). Es un modelo de simulación de cultivos mecanístico orientado hacia el manejo y la toma de decisiones. SWB fue desarrollado en la Universidad de Washington (USA) por Campbell & Díaz (1988) para simular la transpiración de cultivos empleando las bases conceptuales del continuo suelo-planta-atmósfera. En 1993, Campbell & Stockle (1993) aplicaron SWB para el estudio del uso del agua en sistemas agrícolas del noreste de USA. Posteriormente, Marcos (1997) utilizó SWB para analizar el rendimiento de maíz en la mismas condiciones ambientales.

En Argentina, Espósito (2002) utilizó SWB para estudiar el comportamiento de plantas de maíz, los componentes del balance hídrico y su interacción en distintos sistemas de labranza en la región CSC. Pergolini (2003) utilizó SWB para analizar los componentes del balance hídrico en trigo y, Videla Mensegue (2006) empleo SWB para cuantificar el aporte de agua de la capa freática al cultivo de soja; ambos en la misma región. Recientemente, SWB fue aplicado por Espósito *et al.* (2011) para estudiar el balance hídrico y el impacto de la siembra directa en maíces bajo riego en las tierras áridas de Castilla La Mancha (España).

Si bien SWB no es un modelo muy difundido a nivel mundial como e.g. DSSAT, CropSyst o los modelos desarrollados en la Universidad de Agricultura de Wageningen (van Ittersum *et al.*, 2003); todos tienen algunas características en común. Todos son modelos que simulan el crecimiento, desarrollo y generación de rendimiento de un cultivo en un área uniforme de tierra y con un manejo prescripto así como cambios en el agua del suelo (Jones *et al.*, 2003). La familia DSSAT y CropSyst, además, pueden simular el balance de carbono y nitrógeno del suelo (Jones *et al.*, 2003; Stockle *et al.*, 2003). SWB, DSSAT y CropSyst pueden simular secuencias de cultivos

por una larga serie de años y utilizan una estructura de programación en módulos que permite acoplar/desacoplar funciones fácilmente.

Las principales diferencias radican en las funciones que emplean para modelar, complejidad y acceso al código del modelo. En cuanto a las primeras, DSSAT emplea el modelo de eficiencia de uso de radiación (Monteith, 1977) para calcular la biomasa diaria mientras que SWB y CropSyst usan un modelo DUAL que integra el modelo de Monteith (1977) y de eficiencia de uso de la transpiración (Tanner & Sinclair, 1983). El método DUAL permite una estimación más conservadora de la generación de biomasa, en comparación al modelo de eficiencia de uso de radiación, en ambientes áridos a semiáridos (Stockle & Kemanian, 2004). Otra diferencia está en la forma de simular la redistribución de agua en el suelo, DSSAT usa una aproximación “tipo cascada” mientras que SWB y CropSyst emplean la ecuación de flujo de Richard’s. La primera, es apropiada para calcular el agua disponible para el cultivo durante largos períodos de tiempo (e.g. una estación de crecimiento) mientras que la segunda es apropiada para calcular el agua en el perfil de suelo y el transporte de nutrientes (van Ittersum *et al.*, 2003).

La complejidad de los modelos es otro aspecto relevante, tanto DSSAT como CropSyst, a diferencia de SWB, son modelos que integran un gran número de funciones y requieren una cantidad de parámetros importantes para su correcto funcionamiento lo cual tornan dificultosa su calibración. A su vez, ambos modelos son distribuidos como software “empaquetado” sin acceso al código de programación lo cual limita la posibilidad de adaptar el modelo a las necesidades de la investigación mientras que SWB fue programado en Visual Basic para Aplicaciones Excel y tiene libre acceso a los códigos de programación. Por dichos motivos, se optó por emplear el modelo SWB.

1.3. Área de estudio

La región CSC es una de las principales regiones agrícolas del mundo (Fig. 1). Se encuentra en una zona de transición entre las provincias fitogeográficas “chaqueña” – por el norte, “pampeana” – por el sureste, y “andino patagónica” – por el suroeste. En sí misma, constituye una región de cruce, contrastes y variaciones, puntos de encuentro entre acontecimientos originados en sitios opuestos: llanuras al Este, montañas al Oeste; zonas secas, semi – desérticas, húmedas y anegadizas; espejos de agua dulce, naturales y artificiales y un gran mar de aguas saladas; ríos de cuencas endorreicas y que integran la cuenca del Plata; masas de aire provenientes del Atlántico y del Pacífico; y una variedad de suelos que se corresponde con la diversidad climática, de materiales y de relieves (Cabido *et al.*, 2003).

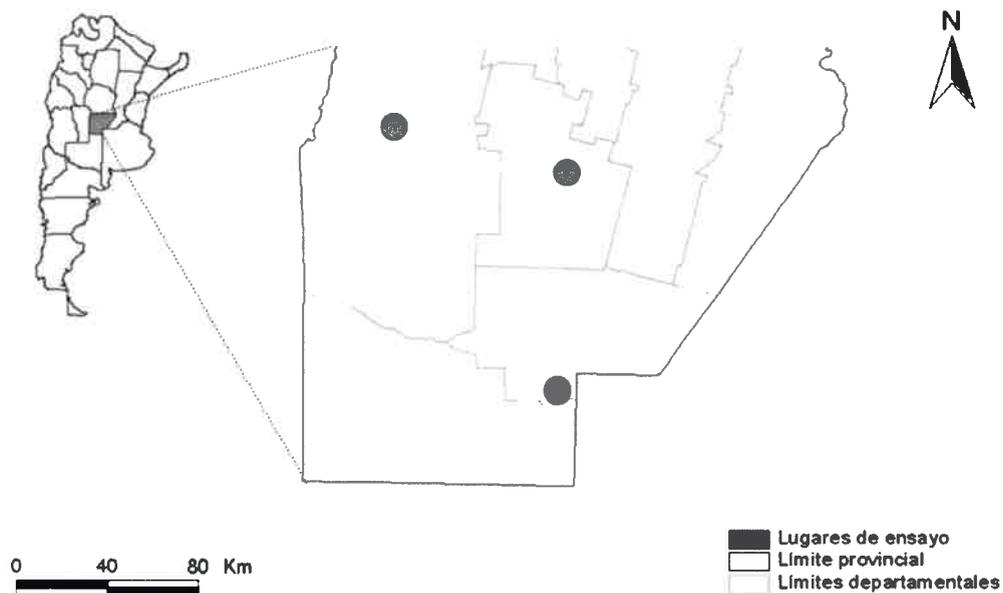


Fig. 1. Área de estudio.

La región presenta un clima templado-subhúmedo con un patrón de precipitaciones de distribución estacional que responde a un régimen monzónico (FAO, 2013). Los meses de diciembre y enero son los que muestran mayor precipitación, seguidos de marzo y noviembre. Por el contrario, los meses de junio, julio y agosto son los que tienen un menor registro de lluvias. El promedio anual de precipitaciones varía de 730 a 900 mm desde el sector noroeste hacia el sudeste de la región CSC. En cuanto a la temperatura máxima media anual, en el sector noroeste, es de 23,5 °C y la temperatura mínima media anual es de 8,8 °C (Degioanni, 1998). En el sector sudeste del área de estudio, la temperatura máxima media anual es de 24,7 °C y una temperatura mínima media anual es de 10,1 °C (Cisneros *et al.*, 2001). El período libre de heladas generalmente alcanza los 8 meses.

La amplia heterogeneidad geológica y geomorfológica determina una variabilidad consecuente en los tipos de suelo (Titonell, 2004). En el sector noroeste de la región CSC, predominan suelos con texturas entre franco limosas y franco arenosas muy finas, donde los perfiles adquieren mayor desarrollo (*Haplustoles típicos*). Hacia el sector sudoeste, se observan perfiles de suelo con menor desarrollo (*Haplustoles énticos* y *Upstisamientos*) y situaciones intermedias respecto de la anterior. Hacia el sector sudeste, en las posiciones de planicies altas, los suelos se desarrollaron sobre materiales eólicos francos o franco-arenosos, dando origen a

Hapludoles típicos o énticos, con perfiles escasamente diferenciados y drenaje interno algo excesivo hasta suelos con mayor desarrollo (*Argiudoles*). Por el contrario, los suelos asociados a las posiciones de planicies bajas muestran claras evidencias de hidrohalomorfismo y taxonómicamente se clasifican como *Natracuoles*, *Natracualfes* y *Duracualfes*.

En los últimos años, la aparición de nuevas tecnologías de manejo e insumos (Viglizzo *et al.*, 2005), el aumento en el régimen de precipitaciones (Suriano & Ferpozzi, 1993; Sierra *et al.*, 2005), y el incremento del precio de los commodities hicieron que los productores cambiaran el uso de estas tierras. Actualmente, el 65% de la superficie cultivable es usada para la producción de cultivos anuales de cosecha con un importante predominio del cultivo de soja (57%) sobre los restantes (maíz, trigo, maní, girasol y sorgo) planteando un desequilibrio en la intensidad y diversidad de las rotaciones de cultivos así como en la estabilidad de los sistemas agrícolas (De Prada & Penna, 2009).

Los rendimientos en grano promedios de la región CSC para soja, maíz y trigo son: 2,7; 7,3 y 2,1 t ha⁻¹, respectivamente (MAGyA, 2013). Sin embargo, los rendimientos máximos alcanzados en la región (según datos aportados por AACREA² Zona Centro³) rondan los 5, 12 y 5,5 t ha⁻¹ para soja, maíz y trigo, respectivamente. Estos resultados marcan una importante brecha entre los rendimientos máximos y promedios logrados por los productores pudiendo atribuirse en parte a diferencias en la eficiencia con que se usan los recursos (agua y nutrientes, principalmente).

La mayor parte de las tierras, en el área de estudio, bajo uso agrícola son cultivadas en siembra directa (De Prada & Penna, 2009). Sin embargo, sus beneficios son disminuidos al conjugarse con rotaciones de cultivos desequilibradas. El predominio de soja sobre el resto de los cultivos (maíz y trigo, principalmente) causa un desbalance en el aporte de residuos que sumado a la obtención de rendimientos medios a bajos debido a la variabilidad de la lluvia está produciendo impactos negativos sobre el suelo.

Las principales funciones ambientales que se están deteriorando son las relacionadas al suelo. Entre las propiedades del suelo más alteradas se pueden mencionar cambios en las relacionadas al comportamiento hídrico, con disminución gradual de las velocidades de infiltración y la conductividad hidráulica (Cisneros *et al.*, 1997); un aumento en la compactación superficial y subsuperficial (Bricchi & Cisneros, 1998; Cholaky, 2003); una reducción en los tenores de materia orgánica (Apezteguía *et al.*, 2004; Titonell, 2004); y un incremento en los potenciales de

² Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA).

³ Datos obtenidos de las últimas 5 (a partir de la campaña 2007/08) campañas agrícolas de soja, maíz y trigo en secano (Fuente: Base de datos AACREA Zona Centro).

pérdida de suelo y agua por erosión hídrica (Cisneros *et al.*, 2005) que ocasionan aportes sólidos y líquidos a los sectores deprimidos.

En síntesis, el agua es un recurso escaso que limita los rendimientos de los cultivos en los sistemas de producción de secano siendo necesario evaluar la eficiencia con la cual se está usando y determinar cuáles son las opciones de mejora. Para lograr dicho objetivo es importante tener una visión más holística del sistema de producción dejando de ser el cultivo en particular el objeto principal de atención y centrar el análisis en la secuencia de cultivos. Es en este aspecto donde se focaliza el problema de estudio de esta tesis. Como se mencionó anteriormente, en la región CSC existe un importante predominio de cultivos de verano y, en especial, soja. Además, no se cuenta con información que permita cuantificar el grado de aprovechamiento del agua aportada por la lluvia así como el impacto en el uso del agua que ocasionan cambios en la intensidad, diversidad y ordenamiento temporal de la secuencia de cultivos. Tampoco se conoce cuál es la combinación de cultivos que presentan mayor aprovechamiento del agua de lluvia en busca de aumentar la PA.

1.4. Hipótesis y objetivos

De acuerdo a lo discutido precedentemente, y con el fin de evaluar el uso del agua de lluvia en las secuencias de cultivos que incluyen la combinación de trigo, soja y maíz; en las condiciones ambientales de la región CSC, se formula la siguiente hipótesis:

“Cambios en el ordenamiento temporal de los cultivos de soja y maíz modifican la PA mientras que aumentos en la intensidad y/o la diversidad de la secuencia de cultivos generan incrementos en la PA de lluvia en las condiciones ambientales de la región CSC.”

El objetivo general de esta tesis es:

Evaluar, mediante el empleo del modelo de simulación SWB, las secuencias de cultivos agrícolas que incluyen la combinación de trigo, soja y maíz; y determinar la mejor combinación en ordenamiento temporal, intensidad, y diversidad de cultivos con el fin de lograr la mayor productividad del agua de lluvia en las condiciones ambientales de la región CSC.

Los objetivos específicos:

1. Adaptar, parametrizar y corroborar la capacidad predictiva del modelo de simulación SWB para las condiciones ambientales de la región CSC y los cultivos de trigo, soja y maíz.
2. Simular diferentes secuencias de cultivos a largo plazo para evaluar la productividad del agua y el impacto de cambios en el ordenamiento temporal, intensidad, y diversidad en las condiciones ambientales de la región CSC.

I.5. Enfoque metodológico

La metodología aplicada en este estudio busca integrar factores antrópicos y biofísicos para analizar su impacto sobre los sistemas agrícolas de secano de la región CSC en pro de evaluar la productividad del agua de lluvia de las secuencias de cultivos. Debido a que los modelos de simulación adaptados y ajustados para el estudio del uso del agua en secuencias de cultivos son pocos, resulta relevante emplear estas herramientas para el análisis de dicha problemática. En especial se adaptará y utilizará el modelo de simulación de cultivos SWB.

Los pasos metodológicos usados en este trabajo para desarrollar el estudio fueron los siguientes:

1. *Evaluación de campo.* Se realizaron nueve ensayos de campo, en tres localidades del CSC durante el año 2007/08, para obtener la información agronómica básica del comportamiento de los cultivos de trigo, soja y maíz. Se recabó información detallada de clima, suelo y cultivos.
2. *Parametrización del modelo.* Los datos experimentales obtenidos en el paso 1 fueron usados para computar algunos de los parámetros básicos de suelo y cultivo para calibrar el modelo SWB.
3. *Corroboración del modelo.* La corroboración del modelo fue realizada con datos de ensayos adicionales realizados en la región CSC durante varios años y en condiciones representativas de clima y suelo recopilados de la bibliografía. Las predicciones del modelo y los datos observados fueron comparados para evaluar la precisión predictiva de SWB.

4. *Aplicación del modelo.* El último paso en el desarrollo de la tesis fue aplicar el modelo en la evaluación del uso del agua de lluvia en secuencias de cultivos. Para ello se siguieron los siguientes pasos:
- a. Diseño de los escenarios a modelar: se establecieron las secuencias de cultivos, condiciones de clima y suelo para realizar las simulaciones.
 - b. Construcción de bases de datos ambientales: para cada lugar geográfico establecido en el punto anterior se generaron bases de datos climáticos históricos y de suelo.
 - c. Configuración del modelo: SWB fue configurado para simular cada una de las secuencias de cultivos, para cada lugar determinado, durante un período de 50 años bajo condiciones climáticas normales de la región.
 - d. Análisis de las simulaciones: los resultados de las simulaciones fueron usadas para evaluar el uso del agua de las secuencias de cultivos en la región CSC. El consumo hídrico, el rendimiento en grano, la captura, la eficiencia y la productividad del agua fueron analizados para las secuencias en estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. Experimento de campo

Una serie de 9 ensayos de trigo, soja y maíz (tres por cultivo) fueron realizados en tres localidades del CSC en el ciclo agrícola 2007/08 para la parametrización del modelo SWB. Los ensayos se realizaron en los siguientes lugares: Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto; elegidos estratégicamente para obtener información en condiciones ambientales representativas del área de estudio que permitieron una buena calibración del modelo.

En los tres sitios de experimentación se evaluó cada cultivo en parcelas de 25 por 10 m con tres repeticiones. Las fechas de siembra y cosecha de cada cultivo son descriptas para cada lugar de ensayo más adelante. Las densidades de siembra fueron 30, 40 y 8 plantas m⁻² para trigo, soja y maíz, respectivamente. La distancia entre hileras fue de 0,245 m para trigo y 0,52 m para soja y maíz. Todos los cultivos fueron sembrados en siembra directa y en ausencia de malezas. Trigo y maíz fueron fertilizados a la siembra con nitrógeno (150 kg ha⁻¹ de nitrógeno sumando suelo más fertilizante) y fósforo, y soja con fósforo siguiendo un criterio de reposición para altos rendimientos. Durante la estación de crecimiento se realizaron aplicaciones de fitosanitarios para mantener los cultivos libres de malezas, plagas y enfermedades. En todos los lugares se recolectaron datos de clima, suelo y cultivo para la parametrización de SWB. A continuación se describen las mediciones realizadas en cada lugar de ensayo:

Laboulaye (34° 27'45'' lat. S – 63° 13'49'' long. W). El trigo (Klein Escorpión) fue sembrado el 10 de junio y cosechado el 12 de diciembre. La soja de segunda (DM 4800 RR) fue sembrada el 15 de diciembre y cosechada el 16 de abril. El maíz (DK 747 RR) fue sembrado el 15 de septiembre y cosechado el 3 de marzo.

Datos climáticos: En el sitio de ensayo se midió temperatura del aire, radiación solar global, velocidad del viento y precipitación diariamente. La temperatura del aire fue monitoreada con una termocupla de cobre – constatan. La radiación solar global fue medida con un piranómetro LI200

(LICOR Inc. Lincoln, NE). La velocidad del viento fue registrada con un anemómetro de tres cazoletas Davis 7911 (Davis Instruments Corp., Davis, CA). La precipitación fue medida con un pluviómetro de cangilones TE525 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT). La radiación solar global, velocidad del viento y temperatura fueron medidas a 2 m de la superficie del suelo con un intervalo de tiempo de un minuto. Los promedios de temperatura del aire, radiación solar global y velocidad del viento y la suma de la lluvia fueron almacenados cada hora. Todos los sensores fueron controlados por un registrador automático de datos CR10X (Campbell Scientific Inc., Logan, UT).

Datos de suelo: el contenido hídrico gravimétrico del suelo se midió siguiendo las profundidades de los horizontes genéticos hasta 2 m de profundidad con tres repeticiones y una frecuencia mensual. Las muestras fueron tomadas dentro de la parcela en un sitio representativo de la densidad del cultivo en términos de la uniformidad de número y distribución de plantas. Las muestras de suelo fueron secadas en estufa a 105 °C. También se caracterizó morfológica y analíticamente el perfil de suelo. Siguiendo la profundidad de los horizontes principales, se determinó la densidad aparente según el método de los anillos (Luters & Salazar Lea Plaza, 2000), la textura (Gee & Bauder, 1986), contenido hídrico a capacidad de campo y marchitez permanente (Klute & Dirksen, 1986). En este lugar se midió la profundidad y salinidad de la capa freática a través de un pozo de observación (freatímetro) (Pizarro, 1978) con una frecuencia mensual.

Olaeta (32° 58'44" lat. S – 63° 47'50" long. W). El trigo (Baguette Premium 13) fue sembrado el 21 de junio y cosechado el 11 de diciembre. La soja de segunda (DM 4200 RR) fue sembrada el 16 de diciembre y cosechada el 15 de abril. El maíz (DK 747 RR) fue sembrado el 29 de septiembre y cosechado el 1 de marzo.

Datos climáticos: se instaló una estación meteorológica automática μ Metos MCR 300 (Pessl Instruments GmbH, Weiz Austria) antes de la siembra de los cultivos para medir temperatura del aire, radiación solar global, velocidad del viento y precipitación. La temperatura del aire fue monitoreada por un sensor de silicio (SMT160-30). La radiación solar global fue medida con una fotocélula (EG&G VACTEC VTB1012). La velocidad del viento fue registrada con un anemómetro de tres cazoletas. La precipitación fue medida por un pluviómetro de cangilones (M523CD). La radiación solar global, velocidad del viento, temperatura y la precipitación fue medida a una altura de 2 m de la superficie del suelo en un intervalo de tiempo de un minuto. Los promedios de temperatura del aire, radiación solar global y velocidad del viento y la suma de la lluvia fueron almacenados cada hora.

Datos de suelo: el contenido hídrico volumétrico del suelo en trigo y soja se midió cada 0,10 m hasta 1 m de profundidad con una sonda de capacitancia (EnviroSCAN, Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia) y con una frecuencia semanal. Además, se tomaron muestras de contenido hídrico gravimétrico hasta 2 m de profundidad para verificar las mediciones de la sonda. Las muestras fueron tomadas dentro de la parcela en un sitio representativo de la densidad del cultivo en términos de la uniformidad del número y distribución de plantas con un intervalo temporal de aproximadamente 10 días. La metodología utilizada para determinar el contenido hídrico, la densidad aparente, textura, contenido hídrico a capacidad de campo y marchitez permanente fueron similares a los descriptos en el sitio anterior.

Río Cuarto (33° 06' 26" lat. S – 64° 17' 48" long. W). El trigo (Baguette Premium 13) fue sembrado el 20 de junio y cosechado el 15 de diciembre. La soja de segunda (DM 4800 RR) fue sembrada 18 de diciembre y cosechada el 20 de abril, mientras que el maíz (DK 747 RR) fue sembrado el 20 de octubre y cosechado el 4 de marzo.

Datos climáticos: obtenidos de una estación meteorológica automática Addvantage Pro 5 (Adcon International Inc. Davis, CA) instalada en el CAMDOCEX de la UNRC. Las variables que se midieron son: temperatura del aire, radiación solar global, velocidad del viento y precipitación. La temperatura del aire fue monitoreada por un sensor de resistencia (Pt 1000 IEC751 Clase B). La radiación solar global fue medida con un sensor de silicio (SP-Lite, Campbell Scientific Inc. Logan, UT). La velocidad del viento fue registrada con un anemómetro de tres cazoletas (Adcon International Inc. Davis, California) mientras que la precipitación fue medida por un pluviómetro de cangilones. La radiación solar global, velocidad del viento, temperatura y la precipitación fueron medidas a una altura de 2 m de la superficie del suelo en un intervalo de tiempo de un minuto. Los promedios de temperatura del aire, radiación solar global y velocidad del viento y la suma de la lluvia fueron almacenados cada hora.

Datos de suelo: el contenido hídrico gravimétrico del suelo se midió siguiendo las profundidades de los horizontes genéticos hasta 2 m de profundidad con tres repeticiones y una frecuencia mensual. Las muestras fueron tomadas dentro de la parcela en un sitio representativo de la densidad del cultivo en términos de la uniformidad de número y distribución de plantas. Las muestras de suelo fueron procesadas según lo descrito para el sitio experimental Laboulaye. Las determinaciones de densidad aparente, textura, capacidad de campo y marchitez permanente fueron similares al descrito para el sitio experimental Laboulaye.

Datos de cultivo: en los tres lugares de ensayo se determinó la biomasa aérea y el rendimiento de grano. Ambos fueron muestreados durante la estación de crecimiento de trigo, soja y maíz con un intervalo de aproximadamente 30 días. Las fechas de emergencia, floración y madurez fisiológica fueron registradas siguiendo las escalas fenológicas de Zadoks (1974), Fehr & Caviness (1977) y Ritchie & Hanway (1997) para trigo, soja y maíz, respectivamente. La biomasa aérea fue muestreada aleatoriamente con tres repeticiones en una superficie de 0,25 m². Las muestras de grano fueron secadas y pesadas según lo indicado por Mills & Jones (1996). El rendimiento de granos fue muestreado manualmente y procesado de manera similar a la biomasa aérea.

II.2. Descripción del modelo

El modelo de simulación utilizado en esta investigación es una versión del modelo SWB (Marcos, 1997) que fue adaptado especialmente en este estudio para poder realizar simulaciones de secuencias de cultivos. SWB es un modelo mecanicista de simulación de cultivos orientado hacia el manejo y la toma de decisiones (Fig. 2); y está diseñado para evaluar el rendimiento y la influencia del ambiente en el cultivo. SWB, estima la acumulación de biomasa del cultivo utilizando un módulo de crecimiento basado en la captura de radiación solar y la transferencia de agua por transpiración (método dual). Esta característica permite que la acumulación de biomasa se estime más ajustada en condiciones de moderado a alto déficit de presión de vapor y donde el rendimiento es limitado mayormente por restricciones hídricas (Stockle & Kemanian, 2004; Videla Mensegue *et al.*, 2007b).

La adaptación para simular secuencias de cultivos consistió en la creación de un módulo de Programación de Secuencias de Cultivos (PSC) y la modificación de la interfaz de usuario con el objetivo de lograr la simulación de sistemas de cultivos. De esta manera, la versión de SWB utilizada en este trabajo puede usarse como una herramienta analítica para evaluar el efecto integrado del clima, suelo, y manejo en el rendimiento en grano de las secuencias de cultivos. En el apartado *Rotación de Cultivos* se explicarán en detalle las adaptaciones realizadas.

Los principales componentes de SWB simulan los procesos de balance hídrico en el sistema suelo – planta – atmósfera, desarrollo, crecimiento foliar y radical, acumulación de biomasa y rendimiento en grano limitados por la disponibilidad de agua y radiación solar (Fig. 3). Estos procesos son afectados por el clima, las características del suelo, cultivo y manejo. Además, el modelo tiene un programador de riego y modela la influencia de la capa freática. En las siguientes secciones se describirán solamente los componentes y relaciones funcionales relevantes a la

discusión del tipo y valores de los parámetros más importantes para la parametrización y corroboración de SWB realizada en este estudio. La mayoría de estas relaciones hacen referencia a la estimación del crecimiento y desarrollo de cultivos.

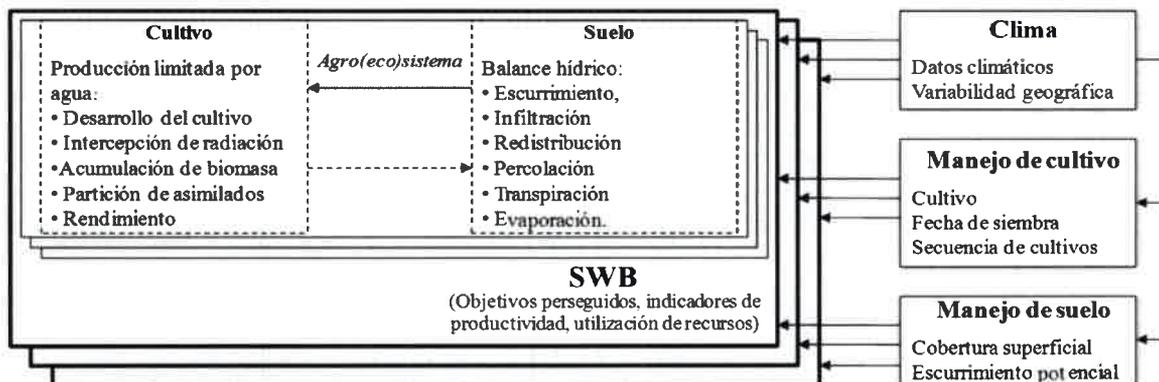


Fig. 2. Representación esquemática del modelo SWB para modelar a escala de lote. Relación de submodelos de clima, suelo, cultivo y manejo para cuantificar la disponibilidad de recursos y su dinámica temporal.

II.2.1. Balance hídrico

La estimación del balance hídrico del suelo incluye los procesos precipitación, riego, escurrimiento, infiltración, aporte de la capa freática, redistribución del agua en el perfil de suelo, percolación profunda, transpiración del cultivo y evaporación (Fig. 3). El escurrimiento disminuye la cantidad de agua que ingresa al suelo y la percolación profunda es la transferencia de agua hacia la capa freática que ocurre por debajo del perfil enraizable como resultado de gradientes gravitatorios. El transporte y almacenamiento de agua en el suelo es resuelto por métodos numéricos siguiendo el método de equilibrio de flujos (Campbell & Norman, 1998). Esta aproximación permite simular flujos ascendentes y descendentes de agua líquida y vapor, absorción de agua por las raíces y almacenamiento de agua en las distintas capas del perfil.

En el modelo, el perfil de suelo es dividido en capas o elementos separados por nodos, en los cuales son definidos el potencial hídrico, la conductividad hidráulica, el contenido hídrico y la fracción de raíces. Los cambios de contenido hídrico en los nodos i en el intervalo de tiempo t se obtienen mediante la resolución simultánea en todo el perfil de la ecuación de balance de agua de Richard's:

$$\rho_w \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z_i} \left(K_i \frac{\partial \Psi_{mi}}{\partial z_i} \right) + g \frac{\partial K_i}{\partial z_i} - U_i \quad [1]$$

donde, ρ_w es la densidad del agua (kg m^{-3}), θ_i es el contenido hídrico volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), t es el tiempo (s), z_i es el espesor de la capa i (m), K_i es la conductividad hidráulica ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$), Ψ_{mi} es el potencial mátrico del suelo (J kg^{-1}) y U_i es la absorción de agua por la raíz ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$). El contenido hídrico y la conductividad hidráulica en cada nodo se relacionan al potencial hídrico del suelo mediante ecuaciones de pedo-transferencia (Campbell, 1974; Marcos, 1997).

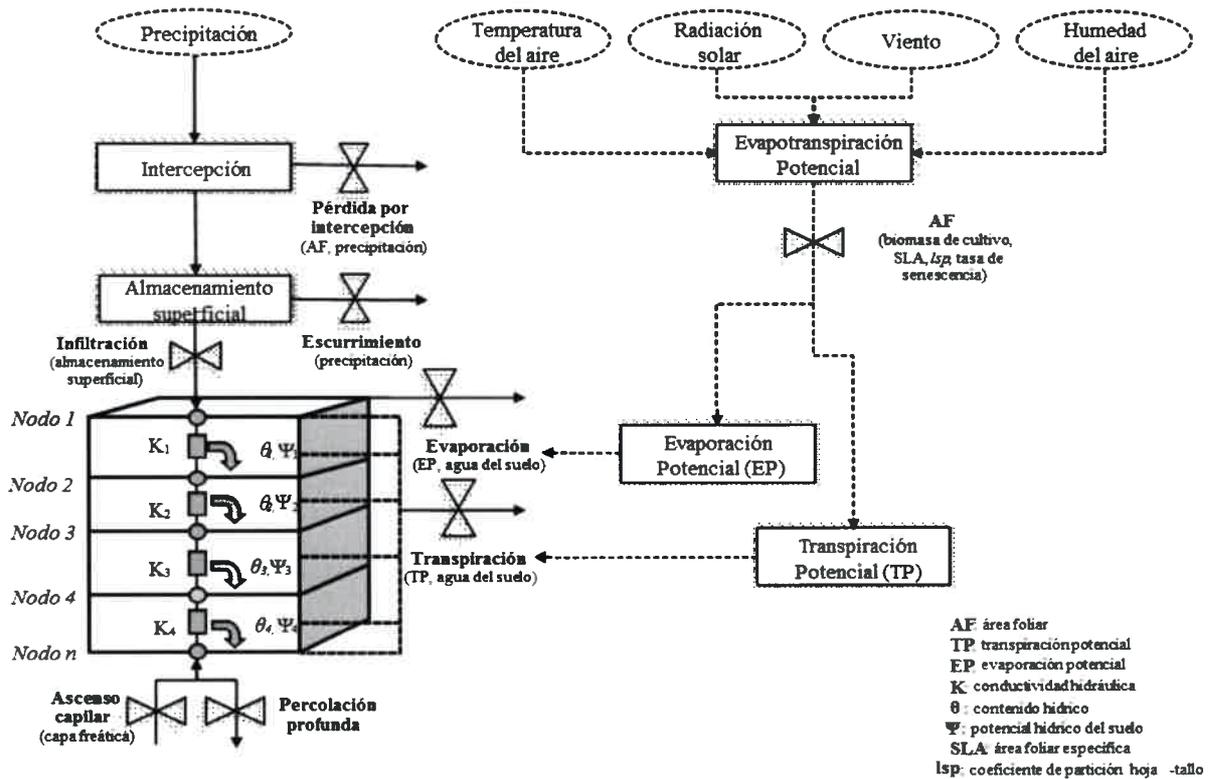


Fig. 3. Representación esquemática del submodelo de balance hídrico del modelo SWB.

La Ec. 1 presenta una limitante para condiciones de flujo hídrico no saturado, el cual es predominante en condiciones naturales en el sistema suelo-planta, la conductividad hidráulica es función de la variable dependiente (potencial o contenido hídrico). Esto resulta en ecuaciones de flujo extremadamente no lineales y la solución numérica de la Ec. 1 se torna muy inestable. Para resolver este problema, se incluye en la Ec. 1 el potencial de flujo mátrico sugerido por Gardner (1958) el cual integra el potencial mátrico y la conductividad hidráulica. Este potencial de flujo

mátrico se usa como fuerza directriz para la solución numérica del balance de agua en la red de nodos y hace que la resolución matemática sea mucho más estable.

En suelos heterogéneos (anisotrópicos) las propiedades hidráulicas son diferentes entre capas de suelo. Esto hace necesario definir dos conjuntos de propiedades hidráulicas: uno por arriba y otro por debajo del límite entre capas. En consecuencia, la Ec. 1 se replantea una vez más para la red de nodos agregando estos dos conjuntos de propiedades hidráulicas relacionadas a cada nodo. Un sistema de ecuaciones se construye para cada uno de los N nodos con N ecuaciones y $N+2$ incógnitas. Estas dos incógnitas resultan las condiciones de límite en la parte superior e inferior del perfil de suelo, respectivamente. En la parte superior la condición de límite la da el flujo evaporativo o el ingreso de agua por infiltración. En la parte inferior la condición de límite la da un valor potencial hídrico similar al del último nodo o, en caso de simular la presencia de una capa freática, un valor de potencial hídrico próximo al de un suelo a saturación. Finalmente, el sistema de ecuaciones no lineales se resuelve interactivamente por métodos numéricos hasta encontrar los valores de potencial hídrico cercano a cero.

La evapotranspiración potencial (*ETP*) se calcula usando el método de Penman – Monteith (Allen *et al.*, 1998). El cálculo de la *ETP* requiere datos diarios de temperatura máxima y mínima, radiación solar global, humedad relativa máxima y mínima y velocidad del viento. La *ETP* se divide en evaporación potencial (*EP*) y transpiración potencial del cultivo (*TP*) basado en la fracción de energía solar disponible que es absorbida por el suelo y la que es interceptada por el cultivo, respectivamente (Campbell, 1985).

La transpiración actual es igual a la suma del agua absorbida por el cultivo en cada capa del suelo. Para ello, primero se calcula la capacidad de absorción de agua de toda la planta en base al potencial hídrico promedio del suelo ponderado por la fracción de raíces desarrollada en cada capa, el potencial hídrico del xilema antes del comienzo del cierre estomático (ψ_{xsc}), el potencial hídrico de la planta a punto de marchitez (ψ_{xwilt}), y la tasa máxima de absorción de agua sin limitante de demanda hídrica por parte del suelo y limitado por la atmósfera (Campbell & Stockle, 1993). Los valores de absorción de agua actuales por las raíces en cada capa del suelo son estimados simultáneamente cuando se realiza la resolución del balance de agua en el perfil de suelo planteado por la Ec. 1. Los potenciales ψ_{xsc} , ψ_{xwilt} y la tasa de absorción máxima de agua son características de cada cultivo (parámetros ingresados al modelo); y describen en conjunto la capacidad de un cultivo para absorber agua.

La fracción diaria de raíces en cada capa de suelo, variable de importancia para el cálculo de transpiración y balance de agua en el suelo, se estima a partir de un patrón de distribución de

raíces en profundidad y un valor de profundidad diaria de raíces. Este último se lo estima en función de la acumulación diaria de tiempo térmico y una profundidad máxima de raíces alcanzable por el cultivo (Borg & Grimes, 1986). La profundidad máxima (P_r) se la ingresa al modelo como un parámetro característico del cultivo.

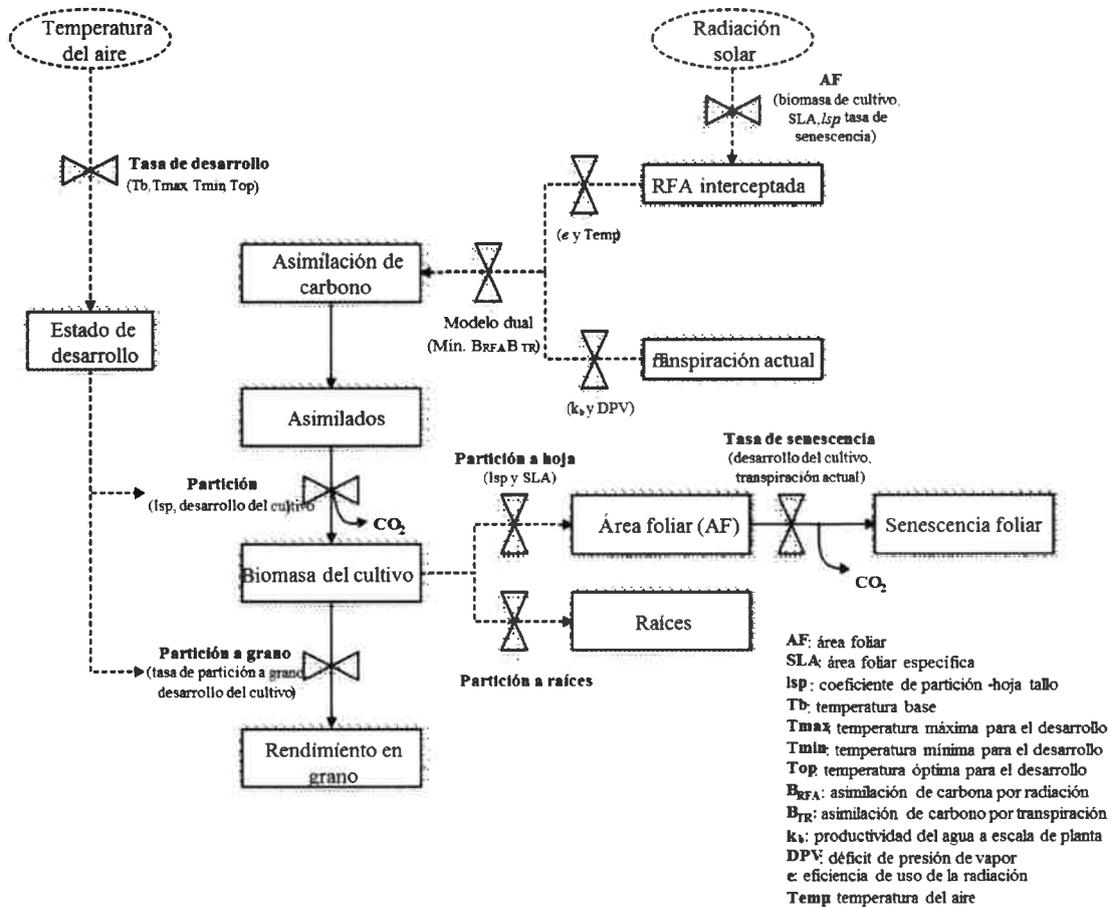


Fig. 4. Representación esquemática del submodelo de desarrollo del cultivo y acumulación de biomasa del modelo SWB.

II.2.2. Desarrollo del cultivo

La tasa de desarrollo del cultivo está controlada por el tiempo térmico. Este es la acumulación diaria de la temperatura promedio del aire por encima de una temperatura base (T_b) y por debajo de una temperatura límite (T_c) para alcanzar un dado estado de desarrollo. El tiempo térmico (expresado en grados días) se acumula desde la siembra y a lo largo de la estación de crecimiento. Los grados días requeridos para completar cada etapa del cultivo, T_b y T_c son ingresados al modelo como parámetros de cada cultivo.

II.2.3. Acumulación de biomasa

El crecimiento de biomasa se calcula como el mínimo entre el crecimiento limitado por radiación y el crecimiento limitado por agua (Fig. 4). El primero es una función de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por el dosel y un coeficiente de conversión de RFA a biomasa (Monteith, 1977):

$$B_{RFA} = e f RFA \quad [2]$$

donde B_{RFA} es la acumulación de biomasa diaria ($\text{kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), e es la eficiencia de uso de la radiación (g MJ^{-1}) (parámetro característico del cultivo), f es la fracción de radiación incidente interceptada por el dosel, y RFA ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) es la radiación fotosintéticamente activa diaria la cual corresponde aproximadamente al 50% de la radiación solar global incidente (Wang *et al.*, 2002; Maddonni & Otegui, 1996).

El crecimiento del cultivo limitado por la disponibilidad de agua se determina de acuerdo a Tanner & Sinclair (1983) como:

$$B_{TR} = \frac{k_b T_{act}}{DPV} \quad [3]$$

donde k_b (Pa) es el coeficiente transpiración - biomasa obtenido experimentalmente como la pendiente de relación entre la transpiración y la biomasa aérea, T_{act} es la transpiración actual del cultivo ($\text{kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y DPV es el déficit de presión de vapor del aire (Pa). La k_b se ingresa al modelo como parámetro característico de cada cultivo. Esta función de acumulación de biomasa se basa en la relación entre la fijación de carbono y la transpiración, en donde, si se restringe el aporte de agua a las hojas, disminuye la pérdida de agua por transpiración y la apertura de los estomas. En consecuencia, se reduce la tasa de absorción de CO_2 y la asimilación de carbono.

La fracción de intercepción de la radiación solar (f) es una función exponencial del índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) y se expresa como:

$$f = 1 - \exp^{-k IAF} \quad [4]$$

donde k es el coeficiente de extinción para la radiación solar promedio del dosel el cual depende de la arquitectura de la planta. El IAF se calcula como una función del área foliar específica (SLA , $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$), el coeficiente de partición hoja - tallo (lsp , kg m^{-2}), la biomasa acumulada y la

senescencia de las hojas. Tanto k , SLA y lsp son parámetros característicos de cada cultivo ingresados al modelo.

La senescencia foliar se computa mediante el control diario de la edad de la hoja. Diariamente, el modelo adiciona edad en un valor igual al incremento diario de tiempo térmico a cada porción de área foliar formada desde el día de la emergencia. A su vez, el modelo remueve del dosel aquella porción de hojas que llegó a su edad límite. De esta forma se computa tanto el área foliar total activa como senescente. La edad límite se llama duración foliar, es expresada en grados días y se ingresa al modelo como un parámetro de cultivo.

II.2.4. Rendimiento de grano

La biomasa distribuida a las partes reproductivas o producto cosechable determina el rendimiento y depende de la distribución del crecimiento diario y acumulado de biomasa una vez alcanzada las etapas reproductivas (Marcos, 1997). Para un cultivo de crecimiento determinado (e.g. maíz), las estructuras reproductivas tienen la mayor prioridad para la distribución de biomasa durante la etapa reproductiva. Para un cultivo de crecimiento indeterminado (e.g. soja) la distribución de la biomasa durante la etapa reproductiva se encuentra compartida entre las partes vegetativas y reproductivas. Esta etapa, en la cual ambos crecimientos reciben una fracción del crecimiento diario, puede terminar en un momento del ciclo del cultivo a partir del cual toda la biomasa generada se destina al crecimiento reproductivo. En el modelo, este punto se llama fase de llenado de grano neto y se lo ingresa al modelo, en unidades de tiempo térmico, como un parámetro característico del cultivo.

II.2.5. Rotación de cultivos

El modelo de simulación SWB integra las funciones biofísicas con un paso de tiempo diario y solo permite la simulación de un cultivo por vez. En consecuencia, fue necesario desarrollar el módulo de Programación de Secuencia de Cultivos (PSC) y adaptarlo a SWB para poder simular secuencias de cultivos. El módulo PSC es similar al utilizado en los modelos DSSAT (Jones *et al.*, 2003) y CropSyst (Stockle *et al.*, 2003). Este desarrollo generó una nueva versión de SWB (SWB-PSC). Como resultado, SWB-PSC incorpora en su corazón los módulos de clima, suelo, cultivo y manejo de SWB para simular un solo cultivo por estación de crecimiento o una rotación de cultivo. Para la inicialización de SWB-PSC se requiere especificar un período de tiempo con

fecha de inicio y fin de la simulación (la fecha de siembra del cultivo es indicada en el módulo PSC). Durante este período de tiempo, las variables de estado tales como el contenido hídrico del suelo, evapotranspiración potencial, evaporación, y profundidad de la capa freática; son actualizadas diariamente con un cultivo creciendo o no (barbecho). Los cultivos son inicializados durante el período de simulación de acuerdo con las instrucciones dadas al PSC (Fig. 5).

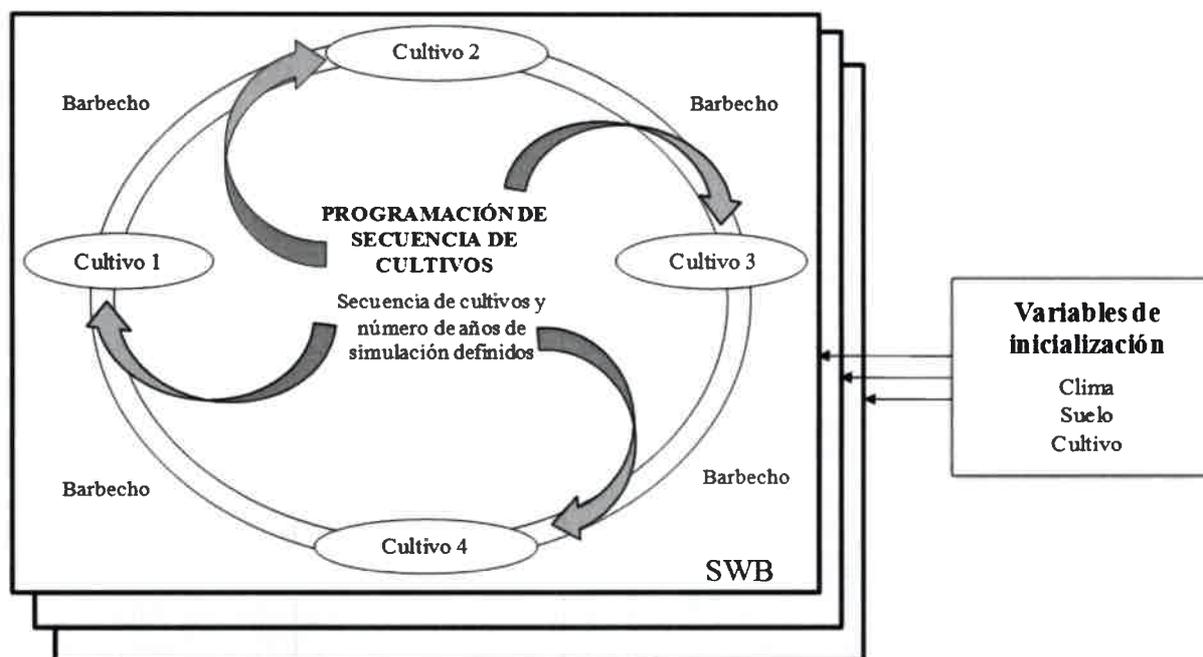


Fig. 5. Representación esquemática del submodelo de programación de secuencia de cultivos del modelo SWB.

El modelo SWB-PSC puede simular rotaciones de cultivos durante 100 años pudiendo asignar fechas de siembras distintas a cada cultivo. Para lograr esta forma de funcionamiento fue necesario modificar la estructura de programación de SWB y rediseñar la interfase de ingreso y salida de información. Actualmente, SWB-PSC necesita una mayor cantidad de datos de inicialización y genera un volumen de datos de salida mucho mayor en comparación a sus versiones anteriores. Además de las variables de inicialización ya mencionadas, es necesario ingresar información de suelo y clima. En SWB-PSC, las variables de salida son agrupadas en: a) climáticas, b) suelo, c) capa freática, y d) cultivo. Cada grupo está integrado por un gran número de variables que pueden ser activadas o no para que SWB-PSC las incluya en las salidas. También, estas variables pueden ser configuradas para que se reporten diaria o estacionalmente. En el primer caso, las variables reportadas por SWB-PSC son mostradas diariamente mientras que, en el segundo, se resumen por estación de crecimiento de cultivo. Estas opciones mejoran

notablemente la capacidad de cálculo y la funcionalidad del modelo. Además, permite la simulación de rotaciones de cultivos de una manera muy simple. SWB-PSC fue programado en Visual Basic para Aplicaciones Excel. Para simplificar la lectura, en el resto del documento se continuará denominando a SWB-PSC como SWB.

II.3. Parametrización y corroboración del modelo

II.3.1. Procesamiento de datos

La información climática registrada por las estaciones meteorológicas de cada sitio experimental fue procesada para obtener valores diarios. Para ello fue desarrollada una hoja Excel en Visual Basic para convertir y completar los datos horarios a diarios. Para cada día se computó la temperatura máxima, mínima y media del aire y se acumularon la radiación solar global y la precipitación. La velocidad del viento fue promediada por día. El *DPV* fue estimado de los datos registrados por las estaciones meteorológicas siguiendo el método de Marcos & Campbell (2002). El *DPV* diario fue estimado como $0,66Dx$, donde Dx es el déficit de presión de vapor a la hora que se da la máxima temperatura [$Dx = s(T_{max} - T_{min})$]. Donde s es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor en el punto de la temperatura promedio entre las temperaturas máximas y mínimas. Este método de predicción del *DPV* a partir de la diferencia de las presiones de vapor a saturación a la temperatura máxima y mínima está basado en el supuesto que el aire se enfría hasta punto de rocío durante la noche y que la presión de vapor se mantiene relativamente constante durante el curso del día.

Los datos medidos por las estaciones meteorológicas fueron comparados con otros registrados en la cercanía de cada sitio experimental. En Laboulaye se utilizaron datos registrados por el Servicio Meteorológico Nacional mientras que en Río Cuarto y Olaeta se utilizaron datos medidos por el Servicio Agrometeorológico de la Universidad Nacional de Río Cuarto. En caso de falta de registros en la base de datos por fallas en las estaciones meteorológicas, los datos fueron estimados por información de estaciones cercanas.

Los valores de los sensores de la sonda de capacitancia fueron calibrados contra los valores de contenido hídrico muestreado gravimétricamente. El contenido hídrico gravimétrico fue convertido a contenido hídrico volumétrico utilizando las determinaciones de densidad aparente. Se analizó el ajuste de cada sensor de la sonda con los datos gravimétricos según la profundidad de la capa monitoreada a través de un análisis de regresión lineal.

La fracción de intercepción de radiación se estimó usando un método de optimización (Welch *et al.*, 2003). Se diseñó un modelo de acumulación de biomasa simple que simula la intercepción de radiación y la transformación a biomasa basado en el método de Monteith (1977). Una función objetivo fue definida para medir la agregación entre los datos de biomasa medidos y simulados. Luego se minimizó dicha función usando el método de Mínimos Cuadrados (Press *et al.*, 1992).

II.3.2. Calibración del modelo

Las funciones de crecimiento implementadas en SWB son controladas por coeficientes y parámetros que interactúan al simular el crecimiento del cultivo. El coeficiente transpiración – biomasa (k_b) fue calculado como la pendiente de la regresión lineal entre la acumulación de biomasa diaria y el cociente entre la transpiración actual y el DPV diario. La transpiración actual del cultivo fue calculada del balance hídrico del perfil de suelo (Kemanian *et al.*, 2005). La e fue calculada como la pendiente de la regresión lineal entre la biomasa acumulada y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFA_i). RFA_i es igual al producto entre RFA y la fracción de intercepción de radiación del cultivo. El ψ_{xsc} , ψ_{xwilt} y la tasa de absorción máxima de agua fueron ajustados en forma integrada mediante aproximaciones hasta lograr el máximo ajuste (mínimo RMSE).

Los grados días necesarios para alcanzar las etapas de emergencia, floración y madurez fisiológica fueron calculadas a través de un método computacionalmente intensivo (Marcos, 2000). El tiempo térmico requerido para alcanzar las fases de emergencia, floración y madurez; y la temperatura base son variados en pequeños incrementos numéricos hasta obtener una diferencia mínima en la suma de cuadrados entre los datos estimados y observados para cada estado fenológico. Los incrementos de tiempo térmico fueron de 10 grados días y los incrementos en la temperatura base de 0,1 °C con una temperatura máxima de desarrollo de 32 °C para trigo y, 40 °C para soja y maíz.

Los parámetros SLA , lsp , k , y la profundidad máxima de raíz fueron obtenidos de la bibliografía. La medición del grado de ajuste entre los valores simulados y observados se realizó con las variables: rendimiento de granos, acumulación de biomasa, consumo de agua del cultivo y contenido hídrico del suelo.

II.3.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó para evaluar la contribución de los parámetros genéticos de cultivo a la variación de los resultados de las simulaciones de SWB. En este caso en particular se analizó la sensibilidad de SWB para la modelación de maíz. El procedimiento consistió en cinco pasos: a) se asignó un valor inicial a cada parámetro genético de cultivo, basado en información de la literatura o supuesta. b) se escogieron las variables de salida y se evaluó la sensibilidad para: acumulación de biomasa, rendimiento de granos y el consumo de agua del cultivo. Estas variables se escogieron por ser las más importantes para el estudio del uso del agua. c) se seleccionaron los parámetros genéticos de cultivo más importantes, se asumió que 8 parámetros pueden afectar mayormente el crecimiento del cultivo. Estos parámetros y su rango de variación son mostrados en la Tabla 4 (*Véase en Apéndice 2*). La variabilidad de los parámetros genéticos fue creada a través de simulaciones de Monte Carlo, el cual consiste en la generación de números aleatorios dentro de un rango determinado de valores. d) se realizó del análisis de sensibilidad. El número de evaluaciones requeridas para calcular el índice de sensibilidad asociado a los 8 parámetros genéticos fue igual a $8N$. En este estudio, N es igual a 100. El modelo SWB fue corrido para 10 escenarios climáticos obteniéndose las repeticiones del índice de sensibilidad para cada N valor de cada parámetro dando como resultado $8 \times 100 \times 10$ escenarios simulados. Las 10 estimaciones fueron promediadas y su ajuste fue evaluado por el desvío estándar con un intervalo de confianza del 95%. e) se calculó el índice de sensibilidad local. La variable de salida de SWB se denomina Y_x (biomasa, rendimiento de granos o consumo de agua del cultivo). Entonces, la varianza total de Y , $V(Y)$, es compuesta por:

$$V(Y_x) = \sum_{i=1}^N D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,8}, \quad [5]$$

donde $V(Y)$ es la varianza total de la variable de salida Y integrada por los 8 parámetros genéticos. D_i es igual a:

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [f(X_{(-i)m}^{(1)}, x_{im}) f(X_{(-i)m}^{(2)}, x_{im})] - \hat{f}_0^2 \quad [6]$$

x_{im} son los m valores de las muestras de los 8 parámetros obtenidos del rango de variación de la Tabla 4, $X_{(-i)m}^{(1)}$ y $X_{(-i)m}^{(2)}$ son dos vectores diferentes que incluyen valores de los 7 parámetros restantes definidos por,

$$X_{(-i)m}^{(1)} = (x_{1m}^{(1)}, \dots, x_{(i-1)m}^{(1)}, x_{(i+1)m}^{(1)}, \dots, x_{8m}^{(1)}) \quad [7]$$

$$X_{(-im)}^{(2)} = (x_{1m}^{(2)}, \dots, x_{(i-1)m}^{(2)}, x_{(i+1)m}^{(2)}, \dots, x_{8m}^{(2)}) \quad [8]$$

$$\hat{f}_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N f(X_m), \dots \quad X_m = (x_{1m}, \dots, x_{im}, \dots, x_{13m}) \quad [9]$$

donde $f(X_m)$ es el correspondiente valor simulado de la variable Y .

El índice de sensibilidad local es derivado de la descomposición de la Ec. [5] como:

$$S_i = D_i / V(Y_x) \quad [10]$$

En síntesis, S_i indica el grado de contribución de cada parámetro genético a la variación de los resultados de las salidas de SWB (biomasa, rendimiento de granos y consumo de agua). Además, este análisis permite identificar cuáles son los parámetros genéticos claves que son necesarios medir o estimar para reducir el grado de incertidumbre en los resultados del modelo (Makowski *et al.*, 2006).

Tabla 4. Parámetros genéticos de cultivo de maíz utilizados en el análisis de sensibilidad y su rango de variación.

Parámetro	Definición	Rango	Unidad
k_b	Coefficiente transpiración-biomasa	6,7 - 10	Pa
e	Eficiencia de uso de la radiación	1,6 - 4,5	$g MJ^{-1}$
k	Coefficiente de extinción solar	0,4- 0,7	
D_f	Duración foliar	800 - 1400	Grados días
Top	Temperatura óptima	25 - 35	$^{\circ}C$
SLA	Área foliar específica	18 - 24	$m^2 kg^{-1}$
P_r	Máxima profundidad radical	1,3 - 2,2	m
l_{sp}	Coefficiente de partición hoja-tallo	2 - 5,8	$kg m^{-2}$

II.3.4. Corroboración del modelo

La corroboración del modelo fue realizada con ensayos experimentales de trigo, soja y maíz realizados en el área de estudio. Se recopilaron 109 experimentos de varias localidades del CSC realizados entre el período 2001-2008 incluyendo localidades como Marcos Juárez, Río Cuarto y Laboulaye. Las variedades y/o híbridos utilizados en los ensayos de corroboración fueron las mismas que en los experimentos de calibración y se incluyeron ensayos de soja de primera y maíz de segunda para verificar el correcto funcionamiento de SWB para estos cultivos. Para cada uno

de los ensayos se armó una base de datos climática usando información del lugar de experimentación o del lugar más próximo. La información de suelo fue tomada de la descripción de los ensayos o bien consultada en Cartas de Suelo de la República Argentina. Para todos los experimentos se recopilaron la fecha de siembra y el contenido hídrico inicial. De no encontrarse el dato de contenido hídrico inicial se simuló un período de aproximadamente 60 días antes de la fecha de siembra para lograr un equilibrio de flujo en el balance hídrico del suelo. Las variables de salida usadas para la corroboración del modelo fueron: biomasa (en distintos estados de crecimiento), rendimiento de granos y consumo de agua del cultivo. Este fue calculado como la suma de los cambios en el contenido hídrico del suelo y la precipitación efectiva durante la estación de crecimiento. La precipitación efectiva fue calculada con el método de la "Curva Número" (SCS, 1972).

II.3.5. Evaluación del grado de ajuste del modelo

El objetivo de evaluar un modelo de cultivo es determinar su grado de ajuste y/o capacidad predictiva para un objetivo de uso dado (Wallach, 2006). SWB fue evaluado por comparación gráfica entre los valores simulados y observados, y por la comparación numérica de la agregación de los datos. El análisis numérico fue realizado por tres indicadores estadísticos: raíz del error medio cuadrático (RMSE, Kobayashi & Us Salam, 2000), raíz del error medio cuadrático relativo (RRMSE, Wallach, 2006) e índice de agregación (d , Willmott, 1982).

El *RMSE* fue calculados como:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (D_i)^2} \quad [11]$$

donde D_i es la diferencia entre el valor obtenido en las observaciones (Y) y el simulado por el modelo (\hat{Y}), N son la cantidad de situaciones u observaciones. El *RRMSE* es calculado según:

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \quad [12]$$

donde \bar{Y} es el promedio de los valores observados de la variable en análisis. Ambos, *RMSE* y *RRMSE*, son indicadores estadísticos que miden la desviación general que muestran los valores simulados con respecto a los observados. El *RMSE* representa la desviación media entre los valores simulados y observados teniendo las unidades de la variable en análisis. El *RRMSE* es el

resultado de la división del *RMSE* por el promedio de los valores observados. Este indicador permite la comparación del error entre diferentes conjunto de datos y modelos al ser independiente de las unidades de la variable en análisis. En cambio, *d* es un indicador estadístico de eficiencia de modelación y se calcula como:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|\hat{Y}_i - Y_i| + |Y_i - \hat{Y}_i|)^2} \quad [13]$$

d es un indicador adimensional que integra la medición del desvío y el coeficiente de correlación entre valores simulados y observados. Este puede ser utilizado para comparar diferentes conjuntos de datos y modelos.

II.3.6. Supuestos y limitaciones de la modelación

La utilización de un modelo de simulación de cultivos implica aceptar ciertos supuestos y limitantes que se describen a continuación:

- a. Los cultivos simulados no presentan limitaciones nutricionales, de malezas, plagas ni enfermedades. Las únicas limitantes presentes en la modelación del crecimiento de los cultivos es la disponibilidad de radiación solar y agua.
- b. La condición física, química y biológica de los suelos se mantiene inalterable durante todo el período simulado.
- c. El grado de cobertura de suelo se mantiene constante durante todo el período simulado.
- d. La fecha de siembra constante para todas las secuencias simuladas no incide marcadamente sobre el comportamiento del cultivo y el rendimiento en grano.
- e. El “efecto rotación” (sinergismo o antagonismo) entre cultivos no es un factor que afecte marcadamente el desempeño de los cultivos.

II.4. Evaluación de la utilización del agua por secuencia de cultivos

II.4.1. Diseño de escenarios de simulación

Se diseñaron escenarios de simulación para evaluar la PA de las secuencias de cultivos formadas por trigo, soja y maíz en un período de tiempo de 50 años. Se simuló el crecimiento de los cultivos en dos localidades: Río Cuarto y Laboulaye. Ambos lugares son contrastantes

ambientalmente y son representativos de la región noroeste y sudeste del área de estudio. Para correr el modelo se utilizó una base de datos ambientales con información de suelo y clima. La base climática fue generada con el modelo ClimGen (Campbell, 1996) el cual fue previamente calibrado por Degioanni & Marcos (1997) y nuevamente testeado para este estudio (*Véase en Apéndice 4*). Fue necesario generar una serie climática debido a la falta de registros históricos con la longitud y calidad de datos suficientes para poder realizar las simulaciones.

Tabla 5. Composición de cultivos, duración, índice de intensidad (IIS), índice de diversidad (ID), proporción de gramíneas (PG) y proporción de maíz (PM) de la secuencia de cultivo. S: soja, M: maíz, T: trigo, T/S: doble cultivo trigo/soja, y T/M: doble cultivo trigo/maíz.

Secuencias	Números de Cultivos	Duración ^a	IIS ^b	ID ^c	PG ^d	PM ^e
		años				
(1) S-S	2	2	1	0,5	0	0
(2) S-M	2	2	1	1	0,5	0,5
(3) T/S-M	3	2	1,5	1,5	1	0,5
(4) T/S-S	3	2	1,5	1	0,5	0
(5) T/M-M	3	2	1,5	1	1,5	1
(6) T/M-S	3	2	1,5	1,5	1	0,5
(7) T/S	2	1	2	1	1	0

^a La duración de la secuencia es evaluada 1 de mayo del primer año hasta el 30 de abril del tercer año (duración de 2 años).

^b El índice de Intensidad de la Secuencia (IIS) es la relación entre el número de cultivos y la duración de la secuencia.

^c El índice de Diversidad de la Secuencia (ID) es la relación entre el número de cultivos distintos y la duración de la secuencia.

^d La Proporción de Gramíneas (PG) es la relación entre el número de cultivos gramíneas y la duración de la secuencia.

^e La Proporción de Maíz (PM) es la relación entre el número de cultivos de maíz y la duración de la secuencia.

En general, las simulaciones se realizaron siguiendo las monoculturas y rotaciones de cultivos comunes en la zona incluyendo trigo, soja y maíz (según información aportada por AACREA). Las secuencias de cultivos simuladas son (Tabla 5): soja – soja (S-S), soja – maíz (S-M), trigo/soja segunda – maíz (T/S-M), trigo/soja de segunda – soja (T/S-S), trigo/maíz de segunda – maíz (T/M-M), trigo/maíz de segunda – soja (T/M-S), trigo/soja segunda (T/S). En la Tabla 5, también se presenta la cantidad de los cultivos, la duración temporal, el índice de intensificación y diversidad de cada secuencia de cultivo, la proporción de gramíneas y de maíz. Estos indicadores se calcularon de la siguiente manera:

- Índice de Intensidad de la Secuencia (IIS): es la relación entre el número de cultivos y la duración de la secuencia (Farahani *et al.*, 1998).
- Índice de Diversidad de la Secuencia (ID): es la relación entre el número de cultivos distintos y la duración de la secuencia.

- Proporción de Gramíneas (PG): es la relación entre el número de cultivos gramíneas y la duración de la secuencia.
- Proporción de Maíz (PM): es la relación entre el número de cultivos de maíz y la duración de la secuencia.

Las fechas de siembra utilizadas para cada cultivo fueron las óptimas para la zona de estudio y se mantuvo para todas las simulaciones. La fecha de siembra de trigo fue 20 de junio (Martini, 2007) mientras que para maíz y soja fue 15 de septiembre (Martini & Angeli, 2014) y 20 de octubre (Angeli, 2014), respectivamente. En los cultivos sembrados posterior al trigo, la siembra se realizó luego de que el cultivo de trigo alcanzó la madurez fisiológica (15 de diciembre). En todos los casos, se asumió que el cultivo se sembró sobre un suelo sin influencia de napa y en un sistema de siembra directa (~ 90% de cobertura de suelo).

II.5.2. Evaluación del uso del agua

La PA para cada secuencia de cultivo se evaluó según el método propuesto por Caviglia *et al.* (2004). Este método analiza la PA como el producto de la captura y la eficiencia de uso del agua en un período de tiempo determinado. Por ejemplo, cuando se analiza la PA de una secuencia de cultivos el período de tiempo considerado comienza con la fecha de siembra del primer cultivo y termina con la madurez fisiológica del último cultivo de la rotación. Es decir, en una rotación T/S-M el período de tiempo comenzaría con la fecha de siembra de trigo y terminaría con la madurez fisiológica de maíz. Para estandarizar la duración de todas las secuencias de cultivos se evaluó la PA desde el 1 de mayo del primer año hasta el 30 de abril del tercer año (duración de 2 años). La PA es calculada como:

$$PA = C_{agua} \times EUA \quad [14]$$

donde C_{agua} (adim.) es la captura de agua calculada como la relación entre la evapotranspiración real estacional y la disponibilidad de agua de lluvia durante el período de tiempo analizado, y EUA ($\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) es la eficiencia de uso del agua calculada como el rendimiento en grano (en términos físicos) por unidad de agua evapotranspirada. La PA engloba dos conceptos, la captura y la EUA , muy importantes para estudiar el aprovechamiento del recurso agua durante el período con y sin cultivo (Caviglia, com. pers.). El rendimiento de los cultivos, EUA y PA de las secuencias fue expresado en términos de producto físico y en glucosa. Los valores usados para la

conversión fueron 1,2; 1,23; y 1,96 g grano g glucosa⁻¹ para trigo, maíz y soja, respectivamente (Penning de Vries *et al.*, 1974).

La diferencia de medias entre secuencias de cultivos fue probada con el test de Tukey siempre que el ANAVA tuviera un nivel de significancia ($p < 0,05$). Los años simulados fueron usados como repeticiones para el análisis estadístico. La asociación entre variables fue evaluada usando análisis de correlación y regresión lineal. Todos los análisis fueron realizados con el paquete estadístico Infostat (Infostat, 2004).

III.1. PARAMETRIZACIÓN Y CORROBORACIÓN DEL MODELO

Los modelos de cultivo pueden ser muy útiles para diferentes propósitos (Steduto *et al.*, 2009). Uno de éstos puede ser: interpretar resultados de trabajos científicos como una herramienta de síntesis y analizar variables agronómicas. La implementación de modelos de cultivos para el estudio de la dinámica del agua y producción de cultivos está muy bien documentada en la bibliografía (Pala *et al.*, 1996; Stockle & Jara, 1998; Sadras *et al.*, 2003; Raes *et al.*, 2006; Moeller *et al.*, 2007). Varios de estos modelos fueron usados para evaluar el impacto de las prácticas de manejo de cultivo y suelo sobre el rendimiento en grano y la PA (Roygard *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2006). Si bien, el estudio de la PA en campos experimentales es muy necesario para evaluar técnicas que permitan mejorar el uso del agua en regiones semi-áridas a sub-húmedas; la alta variabilidad de la precipitación hace que estos experimentos pueden dar resultados poco confiables. Además estos resultados experimentales son específicos para las condiciones ambientales en las que fueron realizados.

Estas limitantes dan la oportunidad a los modelos de simulación de cultivos de proveer un avance hacia el objetivo de maximizar la PA en algunas regiones (Bennie & Hensley, 2001). Esto es posible ya que los modelos tienen la habilidad de utilizar largas series climáticas y generar variadas condiciones de crecimiento para los cultivos y diferentes técnicas de producción en un ambiente particular. No obstante, antes del empleo de los modelos de simulación para el estudio de la dinámica del agua, o cualquier otra variable, es necesario parametrizar y corroborar la capacidad predictiva del mismo.

La parametrización es el proceso de obtención del juego de parámetros que describen cómo un cultivo utiliza los factores ambientales tales como la radiación solar, temperatura, agua y nutrientes (Irmak *et al.*, 2000; Mavromatis *et al.*, 2001; Welch *et al.*, 2003). Tales parámetros pueden ser de dos tipos de acuerdo si son obtenidos utilizando o no el modelo (Wallach &

Genard, 1998). El primer tipo hace referencia, por lo general, a parámetros que se obtienen mediante la comparación de datos observados y simulados. Durante el proceso de parametrización, varios valores de parámetros son testeados hasta que un juego de ellos genere un ajuste aceptable ($RRMSE > 80\%$) entre los valores observados y simulados (Wallach *et al.*, 2001). El ajuste suele evaluarse mediante alguno de los siguientes métodos: i) regresiones no lineales, ii) algoritmos de ajuste específicos, y iii) aproximaciones de prueba y error (Wallach & Genard, 1998; Mavromatis *et al.*, 2001; Mavromatis *et al.*, 2002). El segundo tipo de parámetros hace referencia a aquellos que se obtienen de la bibliografía.

III.1.1. Experimento de campo

III.1.1.a. Clima

Una síntesis de la condición climática durante la estación de crecimiento de trigo, soja y maíz para Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto se muestra en la Tabla 6. La precipitación acumulada para trigo en Laboulaye fue 36% mayor en comparación a Olaeta y Río Cuarto (*Véase en Apéndice 5*). En estas dos últimas localidades, los períodos sin lluvia fueron más prolongados que en Laboulaye. La temperatura media diaria, así como la máxima y mínima diaria, fueron similares para las tres localidades de ensayo. Sin embargo, las temperaturas mínimas absolutas registradas durante los meses de invierno fueron inferiores a las medias históricas en todos los lugares de ensayo (Cisneros, 1994; de Prada *et al.*, 1994; Degioanni, 1998) siendo -8,3; -12,4 y -11,3 °C para Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto, respectivamente (datos no mostrados).

III.1.1.b. Suelo

La Tabla 7 muestra los valores de las propiedades físicas e hidrológicas de los suelos medidas en los sitios experimentales. Como se mencionó anteriormente, los sitios experimentales fueron elegidos para ser ambientes representativos de la región CSC siendo el tipo de suelo el principal criterio de selección. En Olaeta el suelo es clasificado taxonómicamente como *Haplustol éntico* (franco arenoso), mientras que en Río Cuarto y Laboulaye son *Haplustol típico* (franco) y *Hapludol típico* (franco arenoso), respectivamente.

Tabla 6. Resumen de datos climáticos medidos en los ensayos experimentales durante la estación de crecimiento de trigo, soja y maíz en Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto en la estación de crecimiento 2007/08.

Cultivo	Variable	Unidad	Laboulaye	Olaeta	Río Cuarto
Trigo	Precipitación acumulada	mm	368	233	239
	ETP acumulada	mm	586	577	617
	Radiación solar acumulada	MJ m ⁻²	2867	2853	2680
	T. media	°C	13,0	12,0	12,9
	T. máxima	°C	20,7	19,9	19,6
	T. mínima	°C	5,4	4,1	6,2
	Viento	m s ⁻¹	2,49	2,75	2,81
	VPD	kPa	1,06	1,04	0,94
Soja	Precipitación acumulada	mm	303	547	559
	ETP acumulada	mm	639	514	519
	Radiación solar acumulada	MJ m ⁻²	2796	2634	2504
	T. media	°C	22,6	21,6	21,5
	T. máxima	°C	30,9	28,9	27,8
	T. mínima	°C	14,2	14,3	15,2
	Viento	m s ⁻¹	1,82	1,57	1,74
	VPD	kPa	1,87	1,56	1,34
Maíz	Precipitación acumulada	mm	600	604	696
	ETP acumulada	mm	879	1003	866
	Radiación solar acumulada	MJ m ⁻²	4235	4100	4272
	T. media	°C	20,2	19,5	19,8
	T. máxima	°C	28,3	27	26,3
	T. mínima	°C	12	11,9	13,2
	Viento	m s ⁻¹	1,7	3,2	2,5
	VPD	kPa	1,6	1,5	1,29

La granulometría varía desde un 65-68% de arena en Olaeta a 36-49% en Río Cuarto. En Laboulaye el porcentaje de arena varía de 51 a 67% (Tabla 7). El suelo del sitio experimental de Río Cuarto muestra un contenido de limo superior a los otros. Olaeta tiene mayor contenido de arena y menor de arcilla en comparación con Río Cuarto y Laboulaye. Los contenidos de arcilla de estos últimos no difieren significativamente y presentan una mayor anisotropía en comparación con Olaeta. Los valores de densidad aparente, en general, fueron los usuales para los tipos de suelos. El contenido de agua útil (CAU) a un metro de profundidad varía significativamente, Olaeta tiene un CAU de 70 mm mientras que Río Cuarto y Laboulaye tienen 129 y 153 mm por metro de suelo, respectivamente.

Tabla 7. Propiedades físicas e hidrológicas de los suelos medidas en los sitios experimentales.

Lugar	Horizonte	Profundidad del perfil (cm)	Textura	Granulometría			Densidad aparente (g cm ⁻³)	Contenido de humedad volumétrica (cm ³ cm ⁻³)		
				Arcilla	Limo (%)	Arena		0,3 bares	3 bares	15 bares
Laboulaye (Hapludol típico)	Ap	0 - 7	Franco arenoso	14	34,2	51,8	1,21	0,26	0,15	0,14
	A2	7 - 20		13	32,3	54,7	1,48	0,32	0,16	0,14
	AB	20 - 34		17,2	20,2	63	1,54	0,32	0,16	0,14
	Bw1	34 - 48		12,8	27,1	60	1,4	0,29	0,15	0,14
	Bw2	48 - 66		12	24,5	63,4	1,41	0,3	0,15	0,14
	BC	66 - 83		12,4	26,2	61,3	1,37	0,26	0,14	0,13
	C	83 a +		9,7	22,3	67	1,37	0,25	0,13	0,13
Olaeta (Haplustol entico)	Ap	0 - 10	Franco arenoso	8,6	23,5	67,8	1,26	0,17	0,1	0,09
	A2	10 - 23		8,9	22,2	68,8	1,34	0,16	0,09	0,09
	AC	23 - 35		8,7	26	65,3	1,31	0,17	0,11	0,1
	C1	35 - 90		8,4	24,5	67	1,26	0,16	0,09	0,09
	Ck	90 a +		7,4	23,3	68	1,26	0,13	0,09	0,09
Río Cuarto (Haplustol típico)	Ap	0 - 8	Franco	15,7	43,7	40,6	1,14	0,22	0,22	0,11
	A2	8 - 18		15,7	43,4	40,8	1,3	0,35	0,19	0,17
	AB	18 - 29		15,4	48,5	36,1	1,25	0,27	0,16	0,17
	Bw1	29 - 44		14,1	42,1	43,7	1,24	0,26	0,14	0,13
	Bw2	44 - 59		13,4	39,9	46,6	1,29	0,27	0,14	0,13
	BC	59 - 73		13	39,4	47,5	1,29	0,26	0,14	0,12
	C1	73 - 89		13	41,4	45,6	1,29	0,25	0,14	0,12
	C2	89 - 107		11,5	39,4	49	1,29	0,22	0,14	0,12
Ck	107 a +	11,6	41	47	1,29	0,22	0,14	0,13		

III.1.1.c. Cultivo

La Tabla 8 presenta un resumen de las variables de cultivo y suelo más importantes para trigo, soja y maíz en las tres localidades de experimentación. La biomasa acumulada para trigo fue mayor en Río Cuarto (11%) con relación a Laboulaye y Olaeta mientras que el rendimiento en grano fue mayor en Laboulaye. En general, los rendimientos en grano de trigo alcanzados en la estación de crecimiento 2007/08 fueron superiores a los logrados en las últimas campañas agrícolas (Bainotti *et al.*, 2009). En parte, estos rendimientos fueron consecuencia de las moderadas temperaturas que causó el alargamiento de la etapa vegetativa y reproductiva de trigo favoreciendo el crecimiento de los macollos (Slafer *et al.*, 2004) y permitiendo alargar el período de llenado de grano, favoreciendo el peso y la calidad del grano (Abbate *et al.*, 1994). También, es importante destacar la excelente provisión de agua y el aporte que pudo tener la capa freática la cual fue contemplada en la simulación.

Tabla 8. Resultados experimentales de suelo y cultivo para trigo, soja y maíz en Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto en la estación de crecimiento 2007/08.

	Trigo			Soja			Maíz		
	Laboulaye	Olaeta	Río Cuarto	Laboulaye	Olaeta	Río Cuarto	Laboulaye	Olaeta	Río Cuarto
Fecha de siembra	10-jun	21-jun	12-jun	18-dic	12-dic	28-dic	15-sep	15-sep	20-oct
Fecha de emergencia	20-jun	18-jul	05-jul	27-dic	22-dic	05-ene	15-oct	08-oct	30-oct
Fecha de floración	20-oct	26-oct	25-oct	12-feb	05-feb	20-feb	16-dic	24-dic	02-ene
Fecha de madurez	01-dic	07-dic	11-dic	20-mar	30-mar	04-abr	04-mar	01-mar	03-mar
Materia seca total (g m ⁻²)	1221	1175	1342	785	890	628	2410	2228	2749
Rendimiento en grano (g m ⁻²)	500	476	470	436	337	224	1447	771	1375
CHT inicial (mm) [#]	319	570*	462	247	233	326	389	450	453
CHT final (mm) [#]	200	246	260	167	206	388	302	379	347
Precipitación (mm)	389,8	251,7	279	219,7	547	506,4	600,4	604,4	616,8
Consumo de Agua (mm) [^]	342,8	524,7	458,4	404,1	381,2	346,4	624,2	529,0	586,3

CHT Contenido hídrico Total [#] a 2m de profundidad. * Presencia del frente de ascenso capilar dentro de la zona de enraizamiento. ^ La precipitación efectiva fue calculada con el método de la Curva Numero (SCS, 1972).

El rendimiento en grano de soja fue mayor para Laboulaye (23% y 49% respecto a Olaeta y Río Cuarto, respectivamente). Una de las variables ambientales que puede explicar el rendimiento logrado es el aporte de agua de la capa freática. Durante el ciclo del cultivo, la capa freática osciló en una profundidad de 1,8 a 2,1 m (datos no mostrados). Al respecto, existen trabajos que afirman que la capa freática puede aportar agua a los requerimientos hídricos de los cultivos (Dardanelli & Collino, 2002; Videla Mensegue *et al.*, 2007a).

En cuanto al maíz, los rendimientos de granos alcanzados en Laboulaye y Río Cuarto fueron considerablemente altos para cultivos realizados en secano (14110 kg ha⁻¹ en promedio). En el caso de Laboulaye la capa freática pudo tener algún efecto sobre el rendimiento mientras que en Río Cuarto las lluvias registradas durante el período próximo a floración dieron una condición propicia para la formación y llenado de los granos (Tabla 6).

III.1.2. Parametrización del modelo

III.1.2.a. Crecimiento

- *Coefficiente transpiración – biomasa*

Los parámetros de cultivos ajustados para SWB son mostrados en la Tabla 9. El valor ajustado de k_b para trigo es 4,48 Pa (Véase en Apéndice 6). Siddique *et al.* (1990), realizando ensayos de trigo en Australia, comunicaron un valor para k_b de 4,74 Pa mientras que Marcos (2000) reportó un valor de 5,6 Pa para trigo en noroeste de USA. El valor estimado para trigo en este estudio es levemente inferior (4%) al promedio de los valores informados en varios trabajos científicos (Pankuk *et al.*, 1998; Oweis *et al.*, 2000; Angus & van Herwaarden, 2001; Abbate *et al.*, 2004; Steduto & Albrizio, 2005).

Los valores reportados en la literatura de k_b para soja (tanto de primera como de segunda) son pocos. Algunos trabajos mencionan que el rango de valores de k_b para soja es de 3,5 a 6 Pa (Stockle & Nelson, 1996). El valor obtenido en este estudio se encuentra en el rango de valores informados (4,5 Pa). Stockle *et al.* (1997) informaron un valor de 3,5 Pa para soja en Francia. Sin embargo, este valor resulta bajo comparado al mencionado por Tanner & Sinclair (1983) (4 Pa). Howell *et al.* (1998) estimaron un k_b de 8,5 Pa para maíz. Este valor es levemente superior al estimado en este estudio (7,9 Pa). Sin embargo, Stockle *et al.* (1997) y Ferrer & Stockle (1999) comunicaron valores de k_b de 6,7 y 7,4 Pa. Tanner & Sinclair (1983) reportaron valores de k_b para maíz del orden de 8 a 12 Pa mientras que Marcos (1997, 2000) estimó valores de k_b entre 8,4 y 10 Pa. En este sentido, Bellocchi *et al.* (2002) y Espósito (2002) también informaron valores de 8,5 y 9 Pa. Los valores de k_b ajustados fueron usados para modelar el crecimiento de soja de primera y segunda así como maíz temprano y de segunda.

Tabla 9. Parámetros de crecimiento, morfología y fenología de trigo, soja y maíz ajustados en la calibración del modelo SWB.

Parámetros	Trigo	Soja	Maíz
Crecimiento			
Coefficiente transpiración-biomasa (k_b - kPa kg ⁻¹ m ⁻³) [*]	4,48	4,5	7,89
Eficiencia de uso de la radiación (e - g MJ ⁻¹) [*]	1,53	0,97	2,29
Tasa máxima de absorción diaria (mm día ⁻¹) ^{**}	8,5	12	15
Potencial agua de la hoja a cierre estomático (Ψ_{xsc} - J kg ⁻¹) ^{***}	-1000	-1050	-800
Potencial agua de la hoja a marchitez (Ψ_{xwilt} - J kg ⁻¹) ^{***}	-3000	-2000	-1500
Morfología			
Máxima profundidad radical (m) ^{**}	1,7	1,8	1,9
Área foliar específica (SLA -m ² kg ⁻¹) ^{**}	20	30	30
Coefficiente de partición hoja-tallo (lsp - kg m ⁻²) ^{**}	3,3	3	2
Duración foliar - (grados días) ^{**}	750	1200	1000
Coefficiente de extinción solar (k) ^{**}	0,55	0,4	0,5
Fenología			
Temperatura base (T_b - °C) [*]	5	7	9,2
GDD emergencia - (grados días) [*]	66,7	153,3	116,7
GGD floración - (grados días) [*]	783,3	883,3	800
GGD madurez - (grados días) [*]	1383,3	1500	1733,3

*: parámetro calculado de datos experimentales.

** : parámetro obtenido de bibliografía.

*** : parámetro obtenido por calibración con datos de campo.

▪ *Eficiencia de uso de la radiación*

La eficiencia de uso de la radiación (e) para trigo calculada en este estudio fue $1,53 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi. Este valor es inferior al promedio de e ($2,8 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi) encontrado en la bibliografía (Pala *et al.*, 1996; Calderini *et al.*, 1997; Pankuk *et al.*, 1998; Albrizio & Steduto, 2005). Kemanian *et al.* (2004), en una amplia revisión bibliográfica de e para trigo y cebada, mencionan valores entre $2,25$ y $3,06 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi. Caviglia *et al.* (2004) informaron que la e para trigos argentinos varía entre $2,3$ y $2,38 \text{ g MJ}^{-1}$. El valor máximo de e fue reportado por Singh *et al.* (2006) ($4,5 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi) mientras que el mínimo fue $1,26 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi (Sinclair & Bai, 1997).

En soja, la e estimada fue $1,03 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi. Este valor se encuentra levemente por debajo del rango mencionado en la bibliografía (Stockle & Nelson, 1999; Caviglia *et al.*, 2004). Sin embargo, comparando con el valor estimado por Stockle *et al.* (1997) resulta un 20% inferior. Andrade (1995) y Muchow *et al.* (1993) mencionan valores de e de aproximadamente $1,7 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi. El valor mínimo de e encontrado fue $1,2 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi (Sinclair & Horie, 1989).

La e para maíz es inferior a los valores mencionados por Otegui *et al.* (1995) y Kiniry *et al.* (1998). Lindquist *et al.* (2005) informaron valores de e entre $3,74$ y $3,84 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi. Estos valores son bajos comparados con los presentados por Bellocchi *et al.* (2002) quienes reportaron un valor máximo de $4,50 \text{ g MJ}^{-1}$ RFAi mientras que Muchow *et al.* (1990), Andrade (1995), Marcos (2000) y Earl & Davis (2003) informaron valores de e menores a 3 g MJ^{-1} RFAi. Los valores bajos obtenidos de e , comparados con los reportados en la bibliografía, para todos los cultivos puede ser debido a que este parámetro es estable cuando se lo calcula con cultivos sin estrés y en condiciones ambiental con bajo DPV (Stockle & Kemanian, 2004). Por el contrario, el valor de e disminuye con cultivos estresados (agua, temperatura, nutrientes, entre otros). Otro problema es que los valores máximos de e no pueden ser transferidos a ambientes con importante DPV sin ser previamente ajustados.

En consecuencia, los valores de e reportados en la literatura, muestran una gran variabilidad debido al camino fotosintético de la planta (Monteith, 1978); contenido de nitrógeno de la hoja (Muchow & Sinclair, 1994); contenido energético del producto cosechable (Muchow *et al.*, 1993); diferencia en factores ambientales como la temperatura (Andrade *et al.*, 1993), y déficit de presión de vapor (Stockle & Kiniry, 1990; Kiniry *et al.*, 1998; Kemanian *et al.*, 2004). Por el contrario, la k_b es considerablemente más estable en diferentes condiciones ambientales (Sinclair & Muchow, 2001; Steduto, 2003; Steduto *et al.*, 2009) pero es menos utilizada en los modelos de crecimiento de cultivo (Steduto & Albrizio, 2005; Hsiao *et al.*, 2009).

- *Tasa de absorción máxima de agua*

La tasa de absorción máxima de agua diaria recomendada por Stockle & Nelson (1999) varía en un rango de 7 y 13 mm día⁻¹, para varios cultivos. El valor ajustado para trigo en esta investigación se encuentra dentro de este rango de valores y es similar al presentado por Pala *et al.* (1996). Sin embargo, resulta bajo en comparación a los mostrados en otros trabajos (Pankuk *et al.*, 1998; Marcos, 2000). La tasa de absorción máxima estimada para soja es coincidente con lo señalado en la bibliografía (Fauconier, 1986; Stockle & Nelson, 1999; Allen *et al.*, 2003) mientras que en maíz sobrepasa levemente los valores reportados (Stockle & Jara, 1998; Marcos, 2000).

- *Potencial hídrico de la hoja para cierre estomático y marchitez*

El potencial hídrico de la hoja a cierre estomático (Ψ_{xsc}) para trigo, fue -1600 J kg⁻¹ siendo similar a lo informado en la bibliografía (Pala *et al.*, 1996; Pankuk *et al.*, 1998; Stockle & Nelson, 1999). El Ψ_{xsc} para soja estimado en este estudio es -1050 J kg⁻¹ al igual que los valores hallados por Fauconier (1986) y Hesketh & Jones (1980). Stockle & Nelson (1996) reportaron un valor de Ψ_{xsc} mínimo para maíz de -930 J kg⁻¹ el cual es 14% mayor al estimado en este trabajo. Sin embargo, otros trabajos publicaron valores de Ψ_{xsc} que sobrepasan marcadamente al encontrado en este estudio (Marcos, 1997; Stockle & Jara, 1998; Stockle & Nelson, 1999).

El potencial hídrico de la hoja a marchitez (Ψ_{xwilt}) de trigo y soja coincide con el valor hallado por Marcos (2000), en trigo, Fauconier (1986), en soja, y recomendado por Stockle & Nelson (1996), para ambos cultivos. Sin embargo, el valor de Ψ_{xwilt} de trigo supera en 30% a lo reportado por Pala *et al.* (1996) y Pankuk *et al.* (1998) mientras que en soja es 20% inferior según lo mencionado por Hesketh & Jones (1980). Algo similar ocurre en maíz, donde Ψ_{xwilt} es equivalente a lo documentado en la bibliografía (Stockle *et al.*, 1994; Stockle & Jara, 1998; Espósito, 2002; Ferrer *et al.*, 2000). Los valores superiores de absorción máxima de la raíz y potenciales hídricos de la hoja para cierre estomático y marchitez, comparados con los indicados en la bibliografía, pueden ser explicados por los avances en los materiales genéticos de los cultivos. A través de los años, la selección de materiales se realizó buscando plantas que sean capaces maximizar el rendimiento en grano y, a su vez, tolerar el estrés hídrico.

III.1.2.b. Morfológicos

▪ *Máxima profundidad radical*

La máxima profundidad de raíz utilizada para maíz fue 1,9 m, y para soja y trigo fue 1,8 m (datos de bibliografía). Según Borg & Grimes (1986), la profundidad máxima que puede llegar a alcanzar un sistema radical de maíz varía entre 1,5 y 3 m. En este estudio, se midió una profundidad de enraizamiento aproximada de 1,8 m en maíz (datos no mostrados). Esta profundidad es mayor a la reportada por Allen *et al.* (1998) pero menor a las informadas por Jones *et al.* (1991) y Yu *et al.* (2006). La profundidad de enraizamiento máxima documentada para trigo alcanza los 3 m (Borg & Grimes, 1986). Marcos (2000) y Pankuk *et al.* (1998) informaron una profundidad máxima de 1,7 m en concordancia con lo encontrado en este estudio.

Análogamente, otros estudios proponen una profundidad máxima para trigo que varía entre 1 y 2 m (Allen *et al.*, 1998; Yu *et al.*, 2006). En soja, el rango de la profundidad de enraizamiento varía entre 0,6 a 2,6 m (Dardanelli *et al.*, 1997; Allen *et al.*, 1998; Dardanelli *et al.*, 2004b). Facounier (1986) reportó una profundidad máxima de raíz de 2 m siendo un 10% mayor al hallado en este trabajo.

▪ *Área foliar específica*

Los valores de SLA mostrados en la Tabla 9 se encuentran dentro del rango sugerido para los cultivos simulados. Stockle & Nelson (1999) aconsejan valores de SLA entre 15 y 25 m² kg⁻¹ en concordancia con el valor utilizado en este estudio para trigo (20 m² kg⁻¹). No obstante, este valor es superior al presentado por Pala *et al.* (1996). Penning de Vries *et al.* (1989) reportaron valores de 20 y 23,5 m² kg⁻¹ para trigo de primavera e invierno y 30,8 m² kg⁻¹ para cebada. Análogamente, Marcos (2000) estimó un valor de SLA para trigo de 24 m² kg⁻¹.

Pilatti & Norero (2004) mencionan valores de SLA en un rango de 17,8 a 27 m² kg⁻¹ para soja mientras que Pilatti *et al.* (1999) publicó un valor máximo de 32,5 m² kg⁻¹. En estas condiciones, el valor usado en este estudio para soja estaría dentro del rango contemplado por otros trabajos. En maíz, el valor de SLA (24 m² kg⁻¹) fue levemente superior al rango de valores especificado por Pilatti & Norero (2004). Marcos (1997, 2000) midió valores de SLA de aproximadamente 20 m² kg⁻¹. Sin embargo, los valores máximos de SLA para maíz mencionados en la bibliografía alcanzan 45,5 m² kg⁻¹ (Sibma, 1987).

- *Coefficiente de partición hoja - tallo*

Los valores de lsp usados en SWB (Tabla 9), obtenidos de la bibliografía, están dentro del rango propuesto por Stockle & Nelson (1999). Pala *et al.* (1996) informaron un valor de lsp para trigo inferior al usado en este estudio (1 kg m^{-2} menor). Por el contrario, el valor usado en este estudio es un 35% menor al valor de lsp hallado por Marcos (2000). Los valores de lsp en maíz oscilan entre 2 (Ferrer *et al.*, 2000) y $5,8 \text{ kg m}^{-2}$ (Marcos, 2000). Bellocchi *et al.* (2002) y Stockle *et al.* (1997) reportaron valores de lsp para maíz de 2,5 y 3 kg m^{-2} , respectivamente. Cabe aclarar que este parámetro es empírico, lo cual resulta muy variable su estimación (Espósito, com. pers.).

- *Coefficiente de extinción de la radiación solar*

Los valores obtenidos para k están dentro del rango mencionado por Andrade *et al.* (2002). Estos autores afirman que k puede tomar valores entre 0,3 en doseles erectófilos, con hojas casi verticales, y 1,5 en doseles planófilos, con hojas casi horizontales. El coeficiente k depende principalmente del ángulo de elevación solar (Rohrig *et al.*, 1999; Oyarzun *et al.*, 2007), la altura y ancho de las plantas (Rohrig & Stutzel, 2001), la separación entre hileras (Maddonni *et al.*, 2001a; Tsubo & Walker, 2002), la densidad poblacional (Maddonni *et al.*, 2001b), el ángulo de inserción foliar (Campbell & Norman, 1989), la relación azimut solar y azimut de las hileras (Gijzen & Goudriaan, 1989; Bouzo, 2004) y el índice de área foliar (Campbell & Norman, 1998).

Las referencias encontradas en la bibliografía muestran una variabilidad importante en los valores de k para trigo teniendo un valor entre 0,37 (Singh *et al.*, 2006) y 0,8 (Marcos, 2000). El valor k usado en este estudio fue de 0,5 siendo similar al valor reportado por Pilatti & Norero (2004). En soja, el valor de k puede variar entre 0,4 y 0,5 (Stockle & Nelson, 1999). Pilatti *et al.* (1999) mencionan valores de k entre 0,42 y 0,85 mientras que Stockle *et al.* (1997) presentaron un valor de 0,46. El valor de k (0,6) usado para este estudio está dentro del rango expuesto en la bibliografía. El k para maíz es 0,6 siendo superior al rango recomendado por Stockle & Nelson (1999) para doseles con tendencia vertical. Sin embargo, ese valor resulta bajo en comparación a los mostrados por Andrade *et al.* (2002), Pilatti & Norero (2004) y Lindquist *et al.* (2005). Maddonni *et al.* (2001b) reportaron valores de k entre 0,37 a 0,65 en función de la densidad de siembra y el distanciamiento entre hileras.

III.1.2.c. Fenológicos

- *Temperatura base*

La temperatura base (T_b) estimada para trigo fue 3,13 °C siendo levemente superior a los valores encontrados en la literatura (0 a 3 °C) (Pala *et al.*, 1996; Pankuk *et al.*, 1998; Marcos, 2000; Sadras *et al.*, 2002). Para soja, los valores encontrados en la bibliografía varían en un rango de 6 a 10 °C (Fauconier, 1986; Stockle & Nelson, 1996; Sadras *et al.*, 2002) siendo similar al valor hallado en este trabajo. La T_b de maíz es 10,8 °C encontrándose levemente por encima de los rangos publicados (6 a 10 °C) en la bibliografía (Kiniry *et al.*, 1995; Stockle *et al.*, 1997; Espósito, 2002; Ferrer *et al.*, 2000; Marcos, 2000).

III.1.3. Calibración

Los resultados de la calibración de la acumulación de biomasa se muestran en la Tabla 10. Cabe aclarar que en las situaciones de ensayo donde se advirtió la presencia de la capa freática a una profundidad capaz de tener aporte de agua al cultivo, la misma fue tenida en cuenta en la modelación como una variable ingresada al modelo. El grado de ajuste del modelo para la simulación de biomasa de trigo fue $d = 0,95$ y $RRMSE = 7,52\%$. En general, la agregación de los datos (Fig. 9.a) muestra que SWB captura las variaciones en la acumulación de biomasa. Al respecto, Stockle *et al.* (1994) y Pala *et al.* (1996), utilizando el modelo CropSyst, obtuvieron un $d = 0,98$ y $0,94$ y un $RRMSE$ de $10,8$ y 13% , respectivamente. El menor valor de d logrado en este estudio, en parte, puede ser debido a un menor ajuste en la simulación del crecimiento del cultivo en la etapa inicial del mismo, tendiendo a una sobreestimación de la acumulación de biomasa (Fig. 6). Este hallazgo también fue observado por Espósito (com. pers.), una manera de resolverlo puede ser usando el tiempo térmico de desarrollo para simular el crecimiento inicial del cultivo (Stockle *et al.*, 2003). El ajuste de las simulaciones para soja muestran un $d = 0,98$ y $RRMSE = 9,1\%$ (Fig. 7). Estos valores son más bajos que lo reportado para CROPGRO ($RRMSE = 16\%$), en simulaciones realizadas para varias localidades de Argentina (Mercau *et al.*, 2007).

En la bibliografía se publicaron varios trabajos que muestran resultados de la calibración de modelos de simulación para maíz. Algunos de estos modelos, como e.g. CropSyst, FARMSIM (Titonell *et al.*, 2007), AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009) y RZWQM (Cameira *et al.*, 2005) fueron calibrados para la simulación de la acumulación de biomasa. El valor de $RRMSE$ obtenido con SWB es inferior a los valores reportados para CropSyst (Stockle *et al.*, 1997; Ferrer & Stockle, 1999; Ferrer *et al.*, 2000) y AquaCrop (Hsiao *et al.*, 2009). Sin embargo, Cameira *et al.* (2005) y

Ferrer & Stockle (1999) alcanzaron valores más bajos de *RRMSE* que los reportados en este estudio (Tabla 10). No obstante, el valor *d* conseguido con SWB fue más alto que los hallados en la bibliografía (*d* = 0.92) para la simulación de biomasa para los cuatro modelos mencionados anteriormente y seis lugares del mundo (Stockle *et al.*, 1994; Stockle *et al.*, 1997; Ferrer & Stockle, 1999; Ferrer *et al.*, 2000; Hsiao *et al.*, 2009).

Tabla 10. Resumen del análisis estadístico de las simulaciones de acumulación de biomasa, rendimiento de grano, consumo de agua y dinámica del agua en el suelo en trigo, soja y maíz.

Cultivo	Lugar	<i>n</i>	Prom. Obs.	Prom. Est.	RMSE	RRMSE (%)	<i>d</i> (adim.)
Biomasa (kg ha ⁻¹)	Trigo	12	7509	7111	564,9	7,52%	0,95
	Soja	9	3283	3571	299	9,11%	0,98
	Maíz	10	15611	14990	1001	6,41%	0,96
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Trigo	3	4820	4850	36,97	0,77%	0,99
	Soja	3	3323	3326	59,7	1,8%	0,99
	Maíz	3	11976	11413	1461	12,21%	0,99
Consumo de agua (mm)	Trigo	3	441,9	487,2	26,6	6,03%	0,92
	Soja	3	377,2	364,2	16,3	4,32%	0,53
	Maíz	3	579,8	609,2	22,2	3,83%	0,74
Contenido hídrico (cm ³ cm ⁻³)	Trigo	102	0,17	0,16	0,003	1,77%	0,58
	Soja	48	0,18	0,161	0,007	3,97%	0,71
	Maíz	24	0,15	0,14	0,006	3,64%	0,91

La Fig. 9.b muestra el ajuste de los valores observados y simulados de rendimiento de granos para trigo, soja y maíz. En general, el valor de *RRMSE* logrado fue 7,27% mientras que *d* fue 0,96. El *RRMSE* conseguido para trigo fue menor a los hallados en la bibliografía (Staggenborg & Vanderlip, 2005; Raes *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007; Monzón *et al.*, 2007). Así como *d* fue menor en comparación a los valores reportados por Stockle *et al.* (1994) y Pankuk *et al.* (1998), con CropSyst; y Liu *et al.* (2007), con EPIC. Los valores de *RRMSE* y *d* obtenidos para soja son mejores que los hallados en la bibliografía para los modelos CROPGRO (Irmak *et al.*, 2000; Mavromatis *et al.*, 2001; Mavromatis *et al.*, 2002; Mercau *et al.*, 2007) y CropSyst (Stockle *et al.*, 1997). Sin embargo, el *RRMSE* de maíz fue 25% superior a los valores mencionados para CropSyst (Stockle *et al.*, 1994; Ferrer & Stockle, 1999; Ferrer *et al.*, 2000). No obstante, este valor resulta bajo comparado con el *RRMSE* mencionados por Raes *et al.* (2006) y Titonell *et al.* (2007).

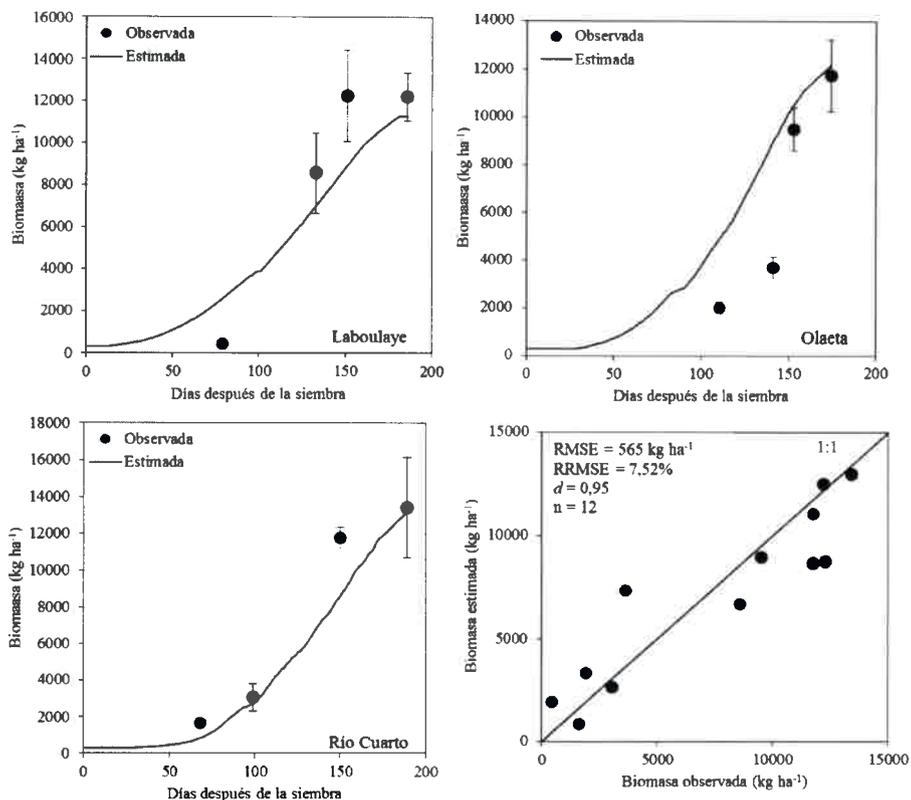


Fig. 6. Calibración y análisis estadístico de la acumulación de biomasa de trigo.

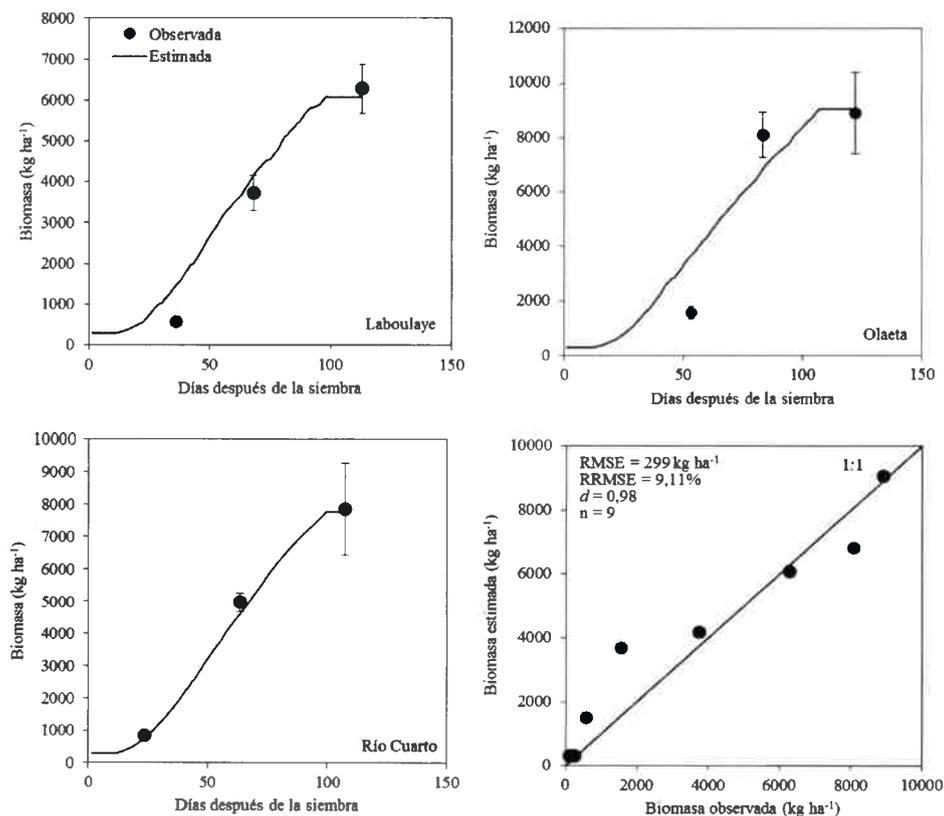


Fig. 7. Calibración y análisis estadístico de la acumulación de biomasa de soja.

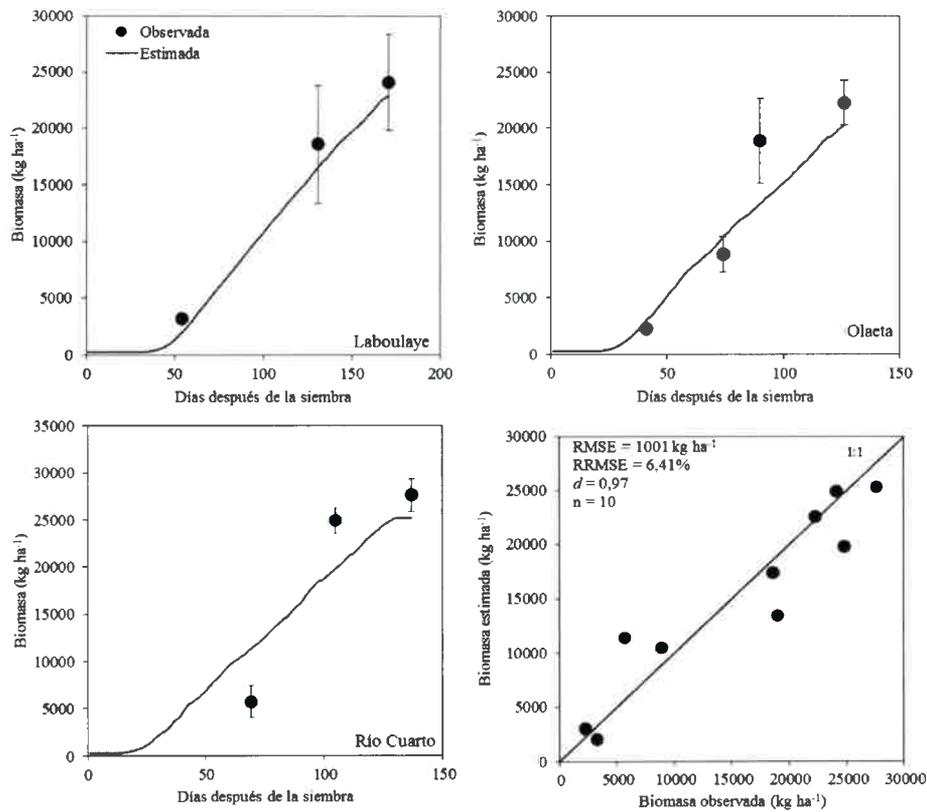


Fig. 8. Calibración y análisis estadístico de la acumulación de biomasa de maíz.

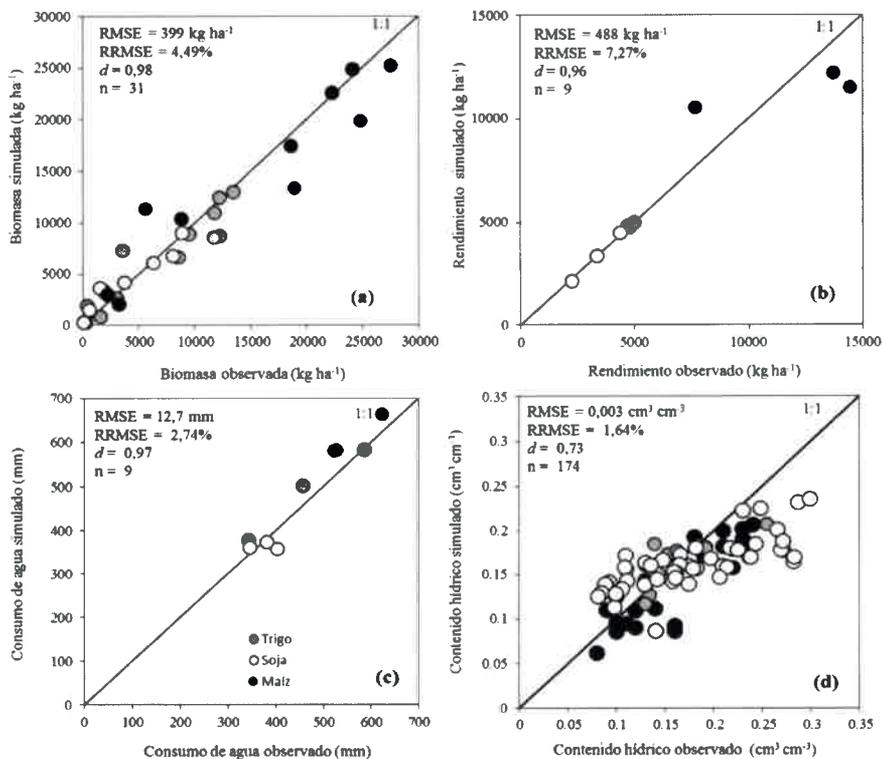


Fig. 9. Valores simulados y observados de biomasa durante el ciclo de los cultivos (a), rendimiento en granos (b), consumo de agua (c), and contenido hídrico del suelo (d) para trigo, soja y maíz. Referencia: círculo gris: trigo; círculo blanco: soja; y círculo negro: maíz.

El consumo de agua simulado y observado para trigo, soja y maíz muestra valores aceptables de *RRMSE* en comparación a los valores reportados en la bibliografía (Fig. 9.c). El *RRMSE* conseguido para trigo fue similar a los valores mencionados para los modelos APSIM (Moeller *et al.*, 2007) e inferior a CropSyst (Pala *et al.*, 1996; Pankuk *et al.*, 1998) mientras que *d* fue similar a los mencionados para estos modelos. Los valores de *RRMSE* y *d* para soja y maíz fueron similares a los mencionados por Stockle *et al.* (1997) y Utset *et al.* (2004).

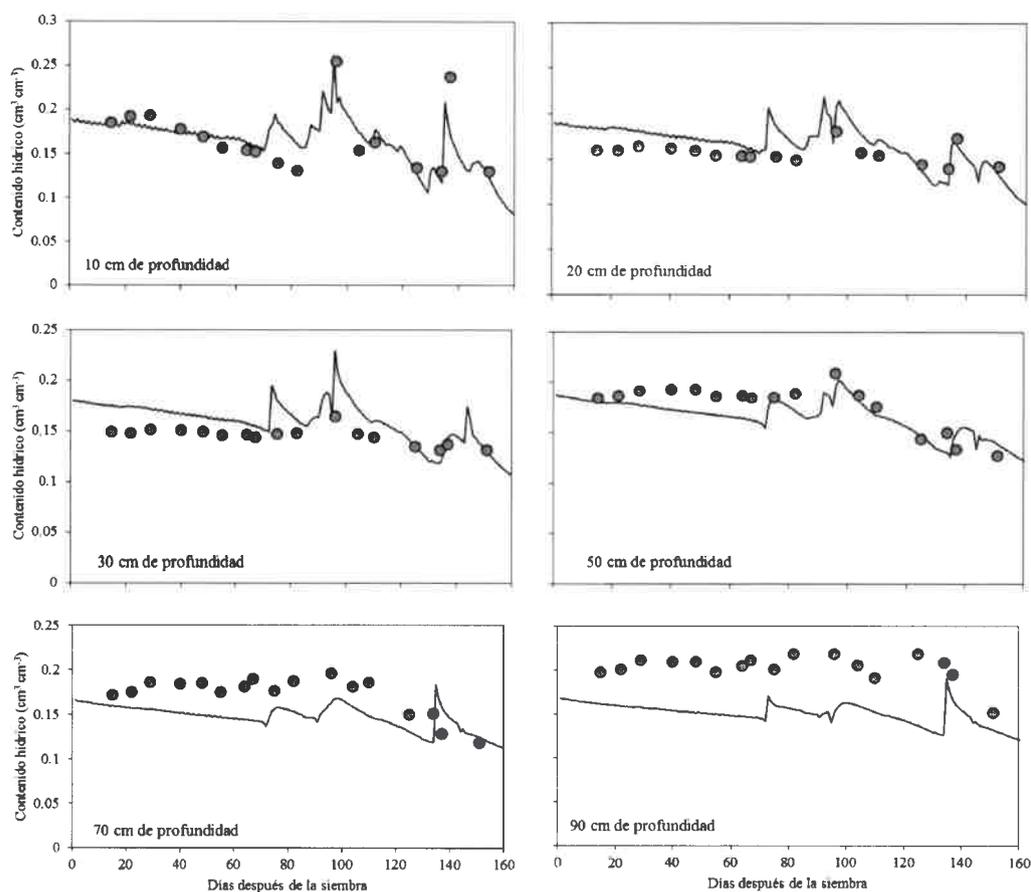


Fig. 10. Calibración de la dinámica del agua en el suelo en trigo (Olaeta).

La evaluación de la simulación de la dinámica del agua en el suelo para trigo, soja y maíz fue realizada para los tres lugares de ensayos pero solamente se muestran los resultados de la localidad de Olaeta (Tabla 10, Fig. 9.d). La simulación del contenido hídrico del suelo para trigo (Fig. 10) mostró el mejor ajuste (*RRMSE* = 1,77%). En soja y maíz la magnitud del *RRMSE* duplicó al valor logrado para trigo (Fig. 11). No obstante, la simulación del contenido hídrico de maíz tiene una mejor agregación (*d* = 0,91) en comparación a los restantes cultivos. En la Fig. 9.d se observa que cuando la cantidad de agua en el suelo es alta, el modelo subestima el contenido hídrico. Esto puede deberse a que la conductividad hidráulica del suelo calculada por el modelo es

mayor a la observada. En consecuencia, el drenaje simulado por SWB resultaría mayor y en consecuencia el contenido hídrico del suelo es menor al observado.

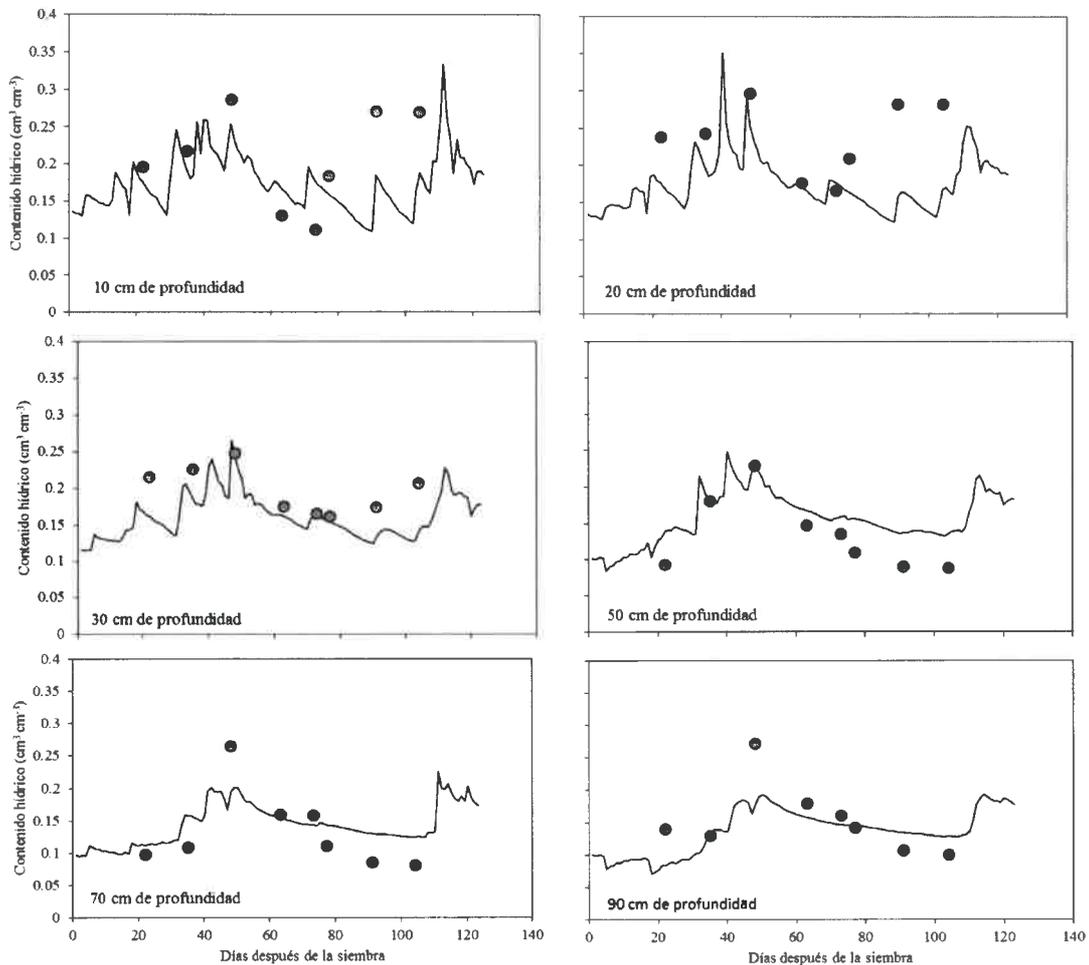


Fig. 11. Calibración de la dinámica del agua en el suelo en soja (Olaeta).

En trigo, Sadras *et al.* (2003) lograron un ajuste de la simulación del contenido hídrico del suelo mejor al alcanzado en este estudio ($RMSE = 0,002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Sin embargo, el ajuste de la simulación del contenido hídrico para trigo de SWB fue mejor comparado con los restantes trabajos analizados (Liu *et al.*, 1998; Stockle & Jara, 1998; Mandal *et al.*, 2002; Raes *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2006). En maíz, Comerma *et al.* (1986) lograron un ajuste similar en la simulación del contenido hídrico del suelo con los modelos CERES al conseguido en este trabajo. No obstante, el grado de ajuste del contenido hídrico de maíz logrado en este trabajo es mejor comparado con los ajustes reportados para los modelos BUDGET (Raes *et al.*, 2006), CropSyst (Bellocchi *et al.*, 2002) y RZWQM (Cameira *et al.*, 2005). Para soja no se encontraron evaluaciones de la simulación del contenido hídrico. Solamente, Confalonieri & Bechini (2004) y

Adekalu & Fapohunda (2006) realizaron evaluaciones del grado de ajuste del contenido hídrico para dos leguminosas (alfalfa y vicia) con los modelos CropSyst y Water Balance, respectivamente.

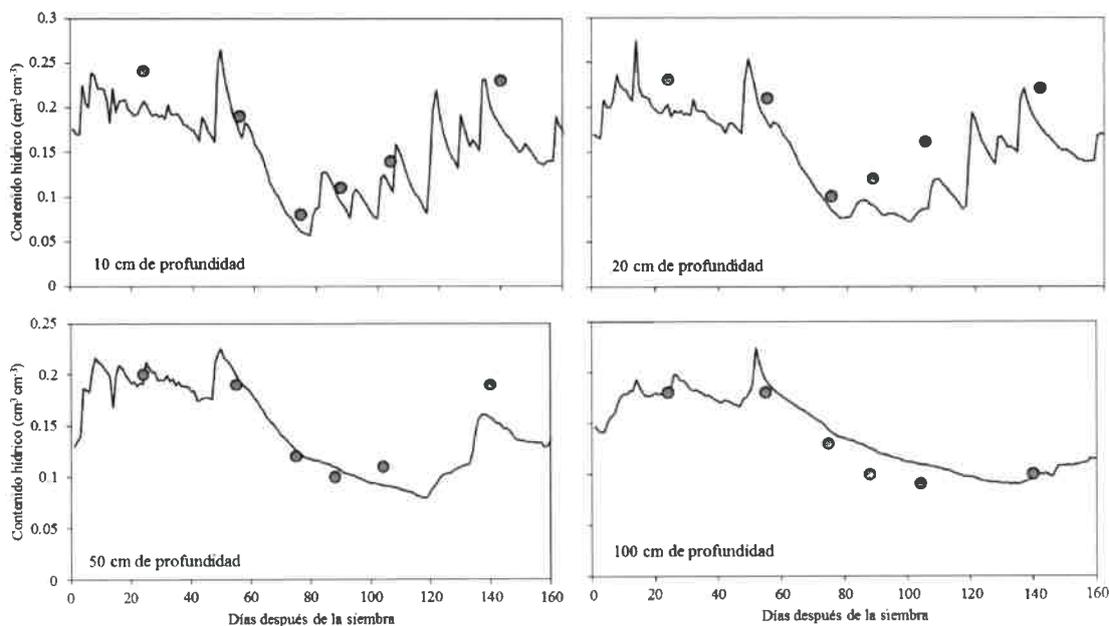


Fig. 12. Calibración de la dinámica del agua en el suelo en maíz (Olaeta).

En síntesis, el ajuste obtenido de SWB permitió capturar las variaciones en la acumulación de biomasa de los tres cultivos simulados, siendo mejor para maíz. El error en la simulación de rendimiento de granos fue similar al mencionado en la bibliografía para varios modelos. Mientras que el grado de ajuste de la simulación del consumo de agua del cultivo fue muy buena. No obstante, el ajuste del contenido hídrico del suelo simulado fue levemente inferior al hallado para otros modelos.

III.1.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de la sensibilidad de la acumulación de biomasa, rendimiento en granos y consumo de agua del cultivo muestra una gran flexibilidad a la variación de algunos de los parámetros de cultivo de SWB (Fig. 13). La acumulación de biomasa y rendimiento de granos (Fig. 13.a y b), mostraron una alta sensibilidad a k_b y e (índice de sensibilidad de 0,42 y 0,3, respectivamente). Esto indicaría que aproximadamente el 42 y 30% de la variabilidad de la acumulación de biomasa y rendimiento en granos puede ser explicada si se conoce el parámetro k_b y e . La fuerte influencia de k_b es lógica ya que este parámetro afecta directamente el submodelo de

acumulación de biomasa al ser un componente de la Ec. [3]. Los parámetros k_b y e son los más importantes del modelo SWB al comandar las relaciones mecánicas del crecimiento de la planta (Marcos, 2000; Albrizio & Steduto, 2005). Además, el modelo de acumulación de biomasa utilizado en SWB puede simular condiciones con limitantes hídricas, como las que se dan en la pampa subhúmeda argentina, donde la biomasa es una función de la transpiración y k_b (Stockle & Kemanian, 2004; Videla Mensegue *et al.*, 2007b). En consecuencia, es razonable que este parámetro sea el más sensible del modelo (Fig. 13).

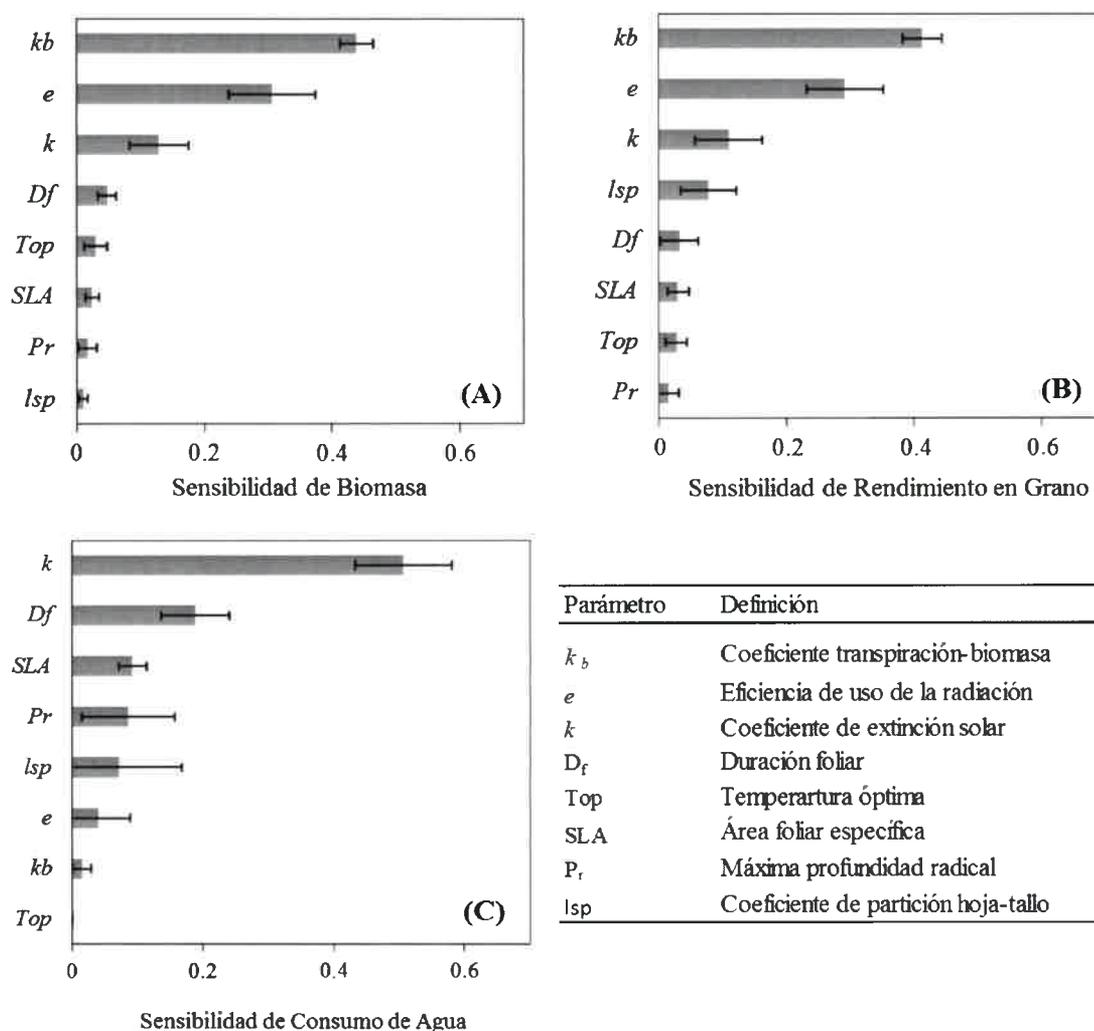


Fig. 13. Índice de sensibilidad de primer orden para las variables acumulación de biomasa (A), rendimiento de granos (B) y consumo de agua del cultivo (C). Las barras horizontales muestran el valor promedio del índice de sensibilidad calculado para 8 parámetros de cultivo. Las líneas indican el desvío estándar del índice obtenido de 10 muestras con un intervalo de confianza de 95%.

El coeficiente de extinción (k) es el tercer parámetro de importancia para la acumulación de biomasa y el rendimiento de granos (Fig. 13). El valor del índice de sensibilidad de k es 0,12. El

resto de los parámetros incluidos en el análisis de sensibilidad tienen un impacto inferior al 5% sobre la acumulación de biomasa y el rendimiento de granos. Esto indicaría que variaciones en sus valores no causarían desviaciones importantes en el grado de ajuste del modelo. No obstante, es destacable que el impacto de estos parámetros no es el mismo para la acumulación de biomasa que para rendimiento de granos (Fig. 13).

El análisis de sensibilidad del consumo de agua del cultivo (Fig. 13.c) muestra una alta respuesta al parámetro k . El efecto de k sobre la cantidad de agua consumida es 51%. Este parámetro afecta la fracción de intercepción de luz (Ec. [4]), la cual define la partición entre evaporación y transpiración potencial. El coeficiente de extinción es influenciado por la arquitectura del dosel, definido en términos del tamaño de hojas, la forma y orientación de los componentes del tallo (Collino *et al.*, 2001; Maddonni *et al.*, 2001b). Los otros dos parámetros que afectan significativamente el consumo de agua del cultivo son la duración foliar - D_f (19%) y el área foliar específica (9%). Ambos modifican el área foliar del cultivo. En consecuencia, estos parámetros que modifican el crecimiento foliar altera la habilidad del cultivo para capturar luz y, por ende, para transpirar.

En síntesis, la simulación de la acumulación de biomasa, rendimiento de granos y el consumo de agua del cultivo de SWB tiene una importante sensibilidad a la variación de los parámetros analizados. Los parámetros k_b y e son los que más impacto tienen (índice de sensibilidad $> 0,1$) sobre la acumulación de biomasa y el rendimiento de granos; mientras que k y la D_f actúan significativamente sobre el consumo de agua.

III.1.5. Corroboración del modelo

El principal objetivo de la corroboración de SWB fue evaluar su capacidad predictiva y el grado de ajuste de la simulación de soja de primera y maíz de segunda, además de maíz de primera, soja de segunda y trigo. La Tabla 11 muestra un resumen de las evaluaciones estadísticas de la calidad predictiva de SWB (Véase Apéndice 7). La evaluación de la predictibilidad de la acumulación de biomasa se realizó para soja y maíz de primera en dos zonas geográficas. El *RRMSE* fue 13,6 y 5,6% para soja y maíz, respectivamente. Estos valores son inferiores a los mostrados en la bibliografía. Mercau *et al.* (2007) informaron un *RRMSE* para soja de 16% utilizando el modelo CROPGRO. Mientras que en maíz varios trabajos realizados con CropSyst mencionan un error de entre 4,8 a 17% (Stockle *et al.*, 1994; Stockle *et al.*, 1997; Ferrer & Stockle, 1999; Ferrer *et al.*, 2000). Hsiao *et al.* (2009) reportaron un *RRMSE* de 11,3% para las

simulaciones de maíz con AquaCrop. Estas magnitudes de error de predicción publicadas para ambos modelos son similares a las logradas en este estudio. En cuanto al valor *d* logrado en este estudio son mejores a los informados para CropSyst (0,91) e igual al de AquaCrop.

Tabla 11. Resumen estadístico de la calidad predictiva de SWB para trigo, soja y maíz en distintos puntos geográficos del área de estudio.

	Cultivo	n	Promedio de observados	Promedio de estimados	RMSE	RRMSE	d
						(%)	(adim.)
Biomasa (kg ha ⁻¹)	Soja ¹	12	5202	5429	707	13,59	0,93
	Maíz ²	18	10192	9808	575	5,64	0,97
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Trigo ³	40	3705	3762	74,56	2,01	0,95
	Soja ⁴	32	3787	3643	63,12	1,67	0,96
	Maíz ⁵	37	11397	11382	104,7	0,92	0,95
Consumo de Agua (mm)	Maíz ⁶	18	435,3	414,6	12,15	4,81	0,97

Referencias: 1- Magliano (2006); Videla Mensegue (2006). 2 - Espósito *et al.* (2002, 2003, 2004, 2006, 2007). 3- AACREA (2005); AACREA (2006); INTA (2004); INTA (2005); INTA (2008); Bainotti *et al.* (2003); Bainotti *et al.* (2004); Frascina *et al.* (2004); Bainotti *et al.* (2006); Bainotti *et al.* (2007); Bainotti *et al.* (2008); Bainotti *et al.* (2009); Frascina *et al.* (2008); Pietrantonio *et al.* (2007); AACREA (2004); AACREA (2006); Bainotti & Grassi (2007); AACREA (2004); AACREA (2005). 4 - Anselmi *et al.* (2004); INTA (2005b); Magliano (2006); INTA (2004); Videla Mensegue (2006); INTA (2007); INTA (2008); INTA (2009); AACREA (2008); AACREA (2009a); Galarza *et al.* (2004); INTA (2005a); Gudelj *et al.* (2007); Distéfano & Gadbán (2007); Lenzi *et al.* (2007); Distéfano & Gadbán (2007); Soldini *et al.* (2008); INTA (2004a); Anselmi *et al.* (2004); AACREA (2005); INTA (2005); Niederhauser *et al.* (2007); AACREA (2008); INTA (2008a); AACREA (2009). 5- AACREA (2007); AACREA (2008); INTA (2005); AACREA (2008a); AACREA (2008); INTA (2009); AACREA (2009); Marelli *et al.* (2003); Vallone *et al.* (2003); Vallone *et al.* (2004); Vallone *et al.* (2004a); Vallone *et al.* (2005); Marelli *et al.* (2005); Vallone *et al.* (2005a); Vallone *et al.* (2007); Vallone *et al.* (2008); INTA (2009); AACREA (2005b); AACREA (2005a); AACREA (2008a); AACREA (2005); AACREA (2008a); AACREA (2009); Espósito *et al.* (2002, 2003, 2004, 2006, 2007); AACREA (2009); AACREA (2007); AACREA (2008); AACREA (2008a); AACREA (2009). 6 - Espósito *et al.* (2002, 2003, 2004, 2006, 2007).

En general, la calidad predictiva del modelo para el rendimiento de granos fue muy buena (RRMSE promedio de 1,5%) comparado con los resultados informados en la bibliografía (RRMSE promedio de 16%). SWB predijo mejor el rendimiento de granos de maíz en comparación a los restantes cultivos. En varios trabajos publicados con distintos cultivos donde se utilizó CropSyst, los mejores ajustes también fueron logrados para maíz (Stockle *et al.*, 1994; Stockle *et al.*, 1997; Ferrer & Stockle, 1999). No obstante, el índice de agregación (*d*), fue similar para todos los cultivos. En cuanto a la calidad predictiva del modelo en función de las zonas geográficas, la mejor predicción fue lograda en Marcos Juárez seguida de Laboulaye y Río Cuarto (*Véase Apéndice*). El RRMSE de soja de primera fue levemente inferior al de soja de segunda (3,11 y 2,09%, respectivamente) mostrando un muy buen ajuste de la simulación de ambos cultivos. En cuanto a maíz, solamente dos ensayos se consiguieron de maíz de segunda con lo cual se evaluó el rendimiento. Si bien el número de datos no permite realizar un análisis estadístico, se puede inferir que el grado de ajuste fue aceptable ($\pm 7\%$ de error).

La capacidad predictiva del consumo de agua para maíz fue similar a la obtenida por otros modelos de simulación con el mismo cultivo (Tabla 11). Un *RRMSE* de 4,81% es levemente inferior al error reportado en algunos trabajos con CropSyst (Stockle *et al.*, 1997; Ferrer & Stockle, 1999). Sin embargo, resulta superior a los errores publicados para los modelos RZWQM (Cameira *et al.*, 2005) y SWAP (Utset *et al.*, 2004). En general, la capacidad predictiva de SWB fue aceptable para todos los cultivos. La predictibilidad de la acumulación de biomasa fue similar a las reportadas para otros modelos de simulación mientras que el rendimiento de granos fue mejor para maíz en comparación a los restantes cultivos. El consumo de agua del cultivo fue similar a lo informado en la bibliografía. Estos resultados indican que SWB es una herramienta adecuada para simular el crecimiento de los cultivos de trigo, soja de primera y segunda, y maíz de primera y segunda en función de la disponibilidad de radiación solar y agua en las condiciones ambientales de la región CSC.

III.2. USO DEL AGUA EN SECUENCIAS DE CULTIVOS

En la región CSC, al igual que en la mayoría de las regiones con clima templado, los productores realizan un sólo cultivo por año y, en general, son cultivos de verano (maíz y soja, principalmente). Según los datos reportados por De Prada & Penna (2009), la superficie con cultivos invernales (trigo y/o verdes de invierno) no supera el 10% del área agrícola ganadera del CSC. Estos cultivos se ordenan de manera diferente formando secuencias que tienen como propósito lograr maximizar el aprovechamiento de los recursos limitantes para la producción. Uno de estos recursos limitantes para los sistemas agrícolas de secano de la región es el agua (Sinclair *et al.*, 2007).

En esta sección se presenta la evaluación del uso del agua de las secuencias de cultivos tradicionales del CSC y algunas combinaciones de cultivos no tradicionales realizadas con el modelo de simulación SWB. En primer término se presentan los resultados de las condiciones de crecimiento de los cultivos y las secuencias simuladas haciendo hincapié en los cambios en el uso del agua que causa el ordenamiento temporal de los cultivos de maíz y soja. Luego se muestran los resultados de la evaluación del uso del agua de las secuencias de cultivos focalizando sobre la captura, eficiencia y productividad del agua relacionados con la intensidad, diversidad, proporción de gramíneas y maíz de las mismas.

III.2.1. Condiciones de Crecimiento de los Cultivos

En la Tabla 12 se muestra un resumen de las condiciones climáticas por cultivo y localidad obtenidas de las simulaciones de las secuencias para Laboulaye y Río Cuarto. El promedio de rendimiento en grano de trigo fue 3686 y 2947 kg ha⁻¹ para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente. Mientras que los consumos de agua fueron 263 y 172 mm para ambos lugares, respectivamente. La EUA fue 14 y 16,8 kg mm⁻¹ evapotranspirado para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente.

Los rendimientos obtenidos en las simulaciones para trigo fueron muy superiores a los promedios reportados en las estadísticas oficiales para toda la provincia de Córdoba (MAGYA, 2013). Sin embargo, no resultan muy diferentes a los registros de productores CREA de la región del estudio. El rendimiento de trigo para la región Centro de AACREA es 3048 kg ha⁻¹ en promedio de las últimas 10 campañas agrícolas (período 2003-2013). Los rindes promedios de

lotes de producción en campos CREA para la zona de Laboulaye y Río Cuarto, alcanzan los 3340 y 2750 kg ha⁻¹ para las últimas 10 campañas, respectivamente. Estas diferencias entre los datos oficiales y los de AACREA pueden ser explicados, en parte, por mayor tecnología de insumo y producto aplicados por estos últimos que permiten lograr estabilizar o elevar el rinde de trigo. Los consumos de agua para ambos lugares son algo bajos comparados con los reportados en la bibliografía que además tienen una variabilidad muy importante al estar influenciados por las prácticas de manejo de suelo y cultivo.

Cabe recordar que para las simulaciones del crecimiento de los cultivos se asumió que los mismos se realizan en sistema de labranza directa y que la cobertura de suelo alcanza el 90%. En consecuencia, la magnitud del componente de evaporación en el consumo de agua del cultivo es relativamente baja siendo la mayor parte transpiración (Espósito *et al.*, 2011). Este factor podría explicar porque el consumo de agua mencionado anteriormente es un poco más bajo que lo reportado en la bibliografía. La EUA promedio es superior a la media mostrada en la Tabla 1 pero se encuentran en el rango de valores informados en la bibliografía. Estos valores de EUA son levemente superiores a los informados por Caviglia & Sadras (2001) y Caviglia *et al.* (2004).

Tabla 12. Precipitación, déficit de presión de vapor (DPV), consumo de agua, biomasa y rendimiento de granos para los cultivos de trigo, maíz temprano y de segunda, soja de primera y segunda para Laboulaye y Río Cuarto simulados con SWB.

Lugar	Cultivo	n	Precipitación* (mm)	DPV (kPa)	Consumo de agua (mm)	Biomasa (kg ha ⁻¹)	Rendimiento en grano
Laboulaye	Trigo	300	243,3a	1,24a	262,9a	7568a	3686a
	Soja temprana	250	370,6b	2,00a	354,8a	8271a	2741b
	Soja segunda	200	424,7a	2,11a	309,7a	7143a	2005a
	Maíz temprano	250	607,1a	1,92a	585,1a	22643a	11667a
	Maíz segunda	100	568,0a	1,97a	314,2a	11960b	5187b
Río Cuarto	Trigo	300	275,9a	1,08b	172,5b	5983b	2947b
	Soja temprana	250	465,7a	1,57b	264,5b	7930b	2854a
	Soja segunda	200	423,5a	1,56b	224,1b	7162a	1930a
	Maíz temprano	250	656,9a	1,48b	424,5b	21288b	11017b
	Maíz segunda	100	506,5a	1,34b	252,8b	13553a	6068a

*Precipitación durante el ciclo del cultivo. Letras distintas indican diferencias significativas entre lugares para un mismo cultivo y variable. Tukey ($p < 0.05$). n: número de datos.

El rendimiento en grano de maíz disminuyó notablemente cuando pasa de un cultivo anual a ser el segundo cultivo en el año llegando a duplicarse el rendimiento de granos en un cultivo temprano versus uno de segunda (Tabla 12). El rendimiento de granos simulados para maíz temprano fue aproximadamente 11342 kg ha⁻¹ mientras que el de segunda alcanza los 5627 kg ha⁻¹

¹. Entre lugares geográficos, el rendimiento en grano de maíz temprano fue levemente superior (5%) a favor de Laboulaye (Tabla 12). Sin embargo, en el maíz de segunda el rendimiento en granos fue un 16% superior en Río Cuarto en comparación con Laboulaye.

Tabla 13. Consumo de agua, rendimiento en grano, y eficiencia de uso del agua (EUA) de trigo, soja de primera, soja de segunda, maíz de primera, y maíz de segunda para Laboulaye y Río Cuarto para las secuencias de cultivos analizadas.

	Consumo de agua (mm)	Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)	EUA (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Consumo de agua (mm)	Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)	EUA (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
<i>Lugar - Cultivo</i>	<i>Laboulaye - Trigo</i>			<i>Río Cuarto - Trigo</i>		
<u>T</u> /S	272,30a	3800a	14,1a	172,0a	2924a	17,1a
<u>T</u> /S-M	255,00bc	3556bc	14,0a	172,2a	2951a	17,2a
<u>T</u> /M-M	246,10c	3442c	13,9a	172,1a	2950a	17,2a
<u>T</u> /M-S	264,70abc	3750ab	14,3a	173,4a	2969a	17,2a
<u>T</u> /S-S	267,00ab	3799a	14,4a	173,3a	2968a	17,2a
Promedio	262,9D	3686C	14,1C	172,5E	2947C	17,2C
<i>Lugar - Cultivo</i>	<i>Laboulaye - Soja de Primera</i>			<i>Río Cuarto - Soja de Primera</i>		
<u>S</u> -M	353,71a	2735a	7,7a	263,8a	2818a	10,7a
<u>S</u> -S	353,37a	2714a	7,7a	264,5a	2848a	10,8a
<u>T</u> /S- <u>S</u>	358,47a	2801a	7,8a	265,1a	2878a	10,9a
<u>T</u> /M-S	355,29a	2739a	7,7a	264,7a	2878a	10,9a
Promedio	354,8B	2741D	7,8D	264,5B	2854C	10,8D
<i>Lugar - Cultivo</i>	<i>Laboulaye - Soja de Segunda</i>			<i>Río Cuarto - Soja de Segunda</i>		
<u>T</u> / <u>S</u> -S	311,1a	2077a	6,6a	222,6a	1896a	8,53a
<u>T</u> / <u>S</u> -M	297,8b	1915a	6,4a	222,6a	1897a	8,54a
<u>T</u> / <u>S</u>	315,0a	2024a	6,4a	225,6a	1995a	8,81a
Promedio	309,7C	2005E	6,5E	224,1D	1929D	8,6E
<i>Lugar - Cultivo</i>	<i>Laboulaye - Maíz Temprano</i>			<i>Río Cuarto - Maíz Temprano</i>		
<u>S</u> -M	602,4a	12078a	20,1a	425,0a	11027a	26,0a
<u>T</u> /S-M	572,3a	11046b	19,9a	424,4a	11015a	26,0a
<u>T</u> /M-M	580,6a	11516ab	19,8a	424,1a	11009a	26,0a
Promedio	585,1A	11667A	19,9A	424,5A	11017A	26,0A
<i>Lugar - Cultivo</i>	<i>Laboulaye - Maíz Segunda</i>			<i>Río Cuarto - Maíz Segunda</i>		
<u>T</u> / <u>M</u> -M	303,4b	4980b	16,6a	252,7a	6067a	23,9a
<u>T</u> / <u>M</u> -S	325,0a	5394a	16,7a	252,9a	6069a	23,9a
Promedio	314,2C	5187B	16,5B	252,9C	6068B	23,9B

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre secuencias para un mismo cultivo y letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos para un mismo lugar. Tukey ($p < 0.05$). La línea subrayada indica al cultivo que se refiere el dato.

Estos rendimientos son notablemente superiores a los reportados por MAGyA (2013) para todo el territorio de la provincia de Córdoba y los registrados en la base de datos de AACREA zona Centro (7500 kg ha⁻¹). El rendimiento de maíz temprano para ambos lugares geográficos

reportados en AACREA varía alrededor de los 8000 kg ha⁻¹ mientras que los de maíz de segunda promedian los 6400 kg ha⁻¹. Estos valores marcan una clara diferencia entre los resultados conseguidos con las simulaciones y los datos obtenidos de lotes de productores para el maíz temprano, pero no así en el de segunda. Sin embargo, los rendimientos máximos logrados en lotes de producción sin riego superan los 11000 kg ha⁻¹ mientras que con riego los rindes máximos logrados en ensayos de producción potencial alcanzan los 18000 kg ha⁻¹ (Espósito *et al.*, 2012) en las mismas condiciones agroecológicas. En consecuencia, es evidente que existe una brecha importante entre los rendimientos logrados en lotes de producción comparados con los máximos alcanzables con y sin riego siendo necesario ahondar en el análisis de las causas de dicha diferencia. Algunas de ellas pueden ser el potencial de rendimiento de los materiales genéticos, el manejo de la nutrición y el correcto uso de la siembra directa.

El consumo de agua del maíz temprano fue mayor al de segunda (entre 85 y 68% para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente – Tabla 12) así como la EUA (21 y 9% para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente – Tabla 12). Los valores de consumo de agua son levemente superiores a los hallados en la bibliografía para el rango de rendimientos obtenidos en maíz temprano y de segunda para ambos lugares. La EUA también resulta algo superior al promedio de los valores hallados en la bibliografía, no obstante no superan los rangos máximos informados (Tabla 3).

Los resultados muestran un menor rendimiento en grano de maíz de segunda el cual puede ser explicado por una menor disponibilidad de radiación solar y agua durante el período de crecimiento del cultivo. Al respecto, resultados preliminares de estudios realizados con modelos de simulación para comparar el rendimiento en grano de maíz temprano versus maíz tardío⁴, en siembras de septiembre y diciembre respectivamente, no muestran diferencias significativas de rendimiento ni consumo de agua (Videla Mensegue, datos no publicados). Resultados similares son observados en la base de datos de AACREA zona Centro para el rendimiento del maíz temprano y tardío. Además, Andrade & Cirilo (2002) señalan que, para las condiciones agroecológicas del CSC, el maíz no experimenta pérdidas importantes de rendimiento en siembras tardías. Incluso en algunos años, el rendimiento de maíz tardío supera al de temprano según la oferta hídrico del año (Espósito, com. pers.).

En consecuencia, esto indicaría que las diferencias observadas en el rendimiento de maíz temprano versus maíz de segunda estarían más vinculadas a la disponibilidad de agua que a la

⁴ Se considera maíz tardío al cultivo sembrado entre fines de noviembre y diciembre y que no tiene un cultivo de invierno como antecesor.

radiación solar. En situaciones con estrés hídrico, la planta de maíz experimenta una reducción en la tasa de expansión foliar y en la conductancia estomática (Andrade & Sadras, 2002). Esto causa una menor acumulación de biomasa y rendimiento en grano que también se asocian a una menor EUR. Por lo tanto, si es posible incrementar la captura de agua para el maíz de segunda sería posible aumentar los rendimientos y acortar la brecha con el maíz temprano.

La EUA fue mayor en maíz temprano en comparación a maíz de segunda (12%). Una posible causa de la disminución de la EUA del maíz de segunda puede ser debida a una menor cantidad de agua almacenada en el perfil de suelo al momento de la siembra que podría ocasionar una mayor probabilidad de sufrir períodos de estrés hídrico que ocasionarían pérdida de rendimiento en grano. Es interesante destacar la amplia diferencia entre la EUA de cultivos de maíz temprano y de segunda entre ambas localidades. La EUA es notablemente superior en Río Cuarto en comparación a Laboulaye (20 y 9% para maíz de primera y segunda, respectivamente). Tanto en maíz temprano como de segunda, los valores de EUA se encuentran dentro del rango informado en la bibliografía (5,25 y 29,2 kg mm evapotranspirado⁻¹). En Argentina, Della Maggiora *et al.* (2002) y Navarro Dujmovich *et al.* (1996) mencionan que la EUA de maíz varía entre 18,4 y 27,9 kg mm evapotranspirado⁻¹. Beltrame (2013) y Rivetti (2006) mencionan valores de EUA similares a los hallados en este trabajo para Río Cuarto y Proot *et al.* (2010) para el norte de la provincia de Buenos Aires.

La respuesta del maíz temprano a las variables analizadas, en las diferentes secuencias de cultivo, no mostró variación en Río Cuarto (Tabla 13). Sin embargo, el maíz temprano simulado en las condiciones ambientales de Laboulaye mostró un mejor comportamiento en la secuencia S-M en alguna de las variables analizadas (Tabla 13). El rendimiento en grano del maíz fue superior en la secuencia S-M en comparación a T/M-M y T/S-M (5 a 9%, respectivamente). En el maíz de segunda, el rendimiento fue 9% superior en la secuencia T/M-S versus T/M-M (Tabla 13). Igual comportamiento mostró el consumo de agua siendo un 7% superior para las mismas secuencias de cultivos. En Río Cuarto no se observaron diferencias entre secuencias.

El rendimiento de granos de soja temprana fue un 37% superior a la soja de segunda en promedio para ambas localidades. La soja temprana obtuvo un rinde de 2800 kg ha⁻¹ mientras que la de segunda alcanzó los 1970 kg ha⁻¹ (Tabla 12). Los rendimientos entre lugares geográficos no difirieron significativamente, en Río Cuarto el rendimiento de soja temprana superó en 4% al de Laboulaye. En soja de segunda, la diferencia es opuesta siendo levemente mayor el rendimiento en Laboulaye (Tabla 13). Estos rendimientos son similares a los reportados por el MAGyA y los registros de AACREA zona Centro. El promedio de rinde de productores CREA del área de

estudio para soja temprana y de segunda es un poco superior a los alcanzados en las simulaciones (3000 y 2200 kg ha⁻¹ para soja temprana y de segunda, respectivamente).

Las diferencias de rendimiento en grano entre las soja temprana y de segunda y, a su vez, entre lugares geográficos puede ser explicado por el comportamiento eco-fisiológico del cultivo. El atraso de la fecha de siembra en soja produce un fuerte acortamiento de los períodos vegetativos y reproductivos ocasionando que el tiempo que la planta tiene para capturar recursos (radiación solar, agua y nutrientes) para la formación y llenado de grano sea menor. Esto origina que el rendimiento de granos se reduzca fuertemente en siembras tardías o de segunda (Andrade & Cirilo, 2002). Este comportamiento también se ve alterado según el grupo de madurez de soja y las condiciones agroclimáticas donde se siembre el cultivo. En cuanto a las condiciones agroclimáticas, datos de AACREA⁵ muestran que el atraso de la fecha de siembra causa reducciones en el rendimiento de diferente magnitud según el lugar geográfico siendo superiores para el sector sur (Laboulaye) del área de estudio comparado con el norte (Río Cuarto) y oeste (Villa Valeria).

El consumo de agua fue superior en soja temprana en comparación a soja de segunda, la primera consumió entre 265 a 355 mm dependiendo del lugar mientras que la de segunda varió entre 224 y 308 mm (Tabla 12). Estos valores se encuentran en el rango de consumos de agua reportados en la bibliografía para los rendimientos obtenidos. El consumo de agua en soja temprana fue notablemente superior en Laboulaye en comparación a Río Cuarto (34%). En soja de segunda, esta diferencia se acentuó más siendo la diferencia de 38%. Esta diferencia del consumo de agua puede deberse a condiciones climáticas diferentes entre lugares geográficos, básicamente relacionadas al DPV. Durante el período de crecimiento del cultivo, tanto en soja temprana como de segunda, el DPV en Laboulaye fue aproximadamente 23% mayor que en Río Cuarto.

La EUA de soja temprana y de segunda fue diferente siendo mayor en los cultivos tempranos aproximadamente en un 20% (Tabla 13). Entre lugares geográficos, hubo diferencias en la EUA siendo un 39 y 32% mayor en Río Cuarto en soja de primera y segunda, respectivamente. Los valores de EUA para soja en Laboulaye fue 7,8 y 6,5 kg mm evapotranspirado⁻¹ en soja temprana y segunda, respectivamente. En Río Cuarto, la EUA fue 10,8 y 8,6 kg mm evapotranspirado⁻¹ para soja temprana y segunda, respectivamente. Algunos de estos valores resultan superiores al promedio obtenido en la revisión bibliográfica (Tabla 2). Los valores de EUA obtenidos en Laboulaye se encuentran en el rango máximo reportado por Dardanelli *et al.* (1991) y Salado

⁵ Análisis de campaña del cultivo de soja 2007/08 al 2012/13.

Navarro *et al.* (2006). Sin embargo, los valores obtenidos para Río Cuarto son superiores a los hallados en la mayoría de los trabajos. No obstante, Andrade & Sadras (2002) y Rao & Northup (2008) mencionan valores EUA para soja entre 11 y 13 kg mm evapotranspirado⁻¹ para Argentina y Reino Unido, respectivamente.

Comparando el comportamiento del cultivo de soja temprano entre secuencias, para ambos lugares, no se observaron diferencias en las variables analizadas. En soja de segunda aparecen diferencias más notables. En Laboulaye, el consumo de agua de soja de segunda fue 5% inferior en la secuencia T/S-M en comparación a T/S-S y T/S.

La Tabla 14 muestra los resultados de la captura de agua de maíz, soja, trigo/soja de segunda y trigo/maíz de segunda. En general, la captura de agua del maíz temprano varió entre 0,65 a 0,70 para Río Cuarto y Laboulaye, respectivamente; mientras que los dobles cultivos trigo/soja y trigo/maíz varió entre 0,67 a 0,65 para Laboulaye y 0,60 a 0,63 en Río Cuarto. Estos resultados muestran que el doble cultivo utiliza una fracción similar de agua comparado con un solo cultivo anual de maíz ($p < 0,05$). Además, esto indica que entre un 30 a 40% de la precipitación anual no fue usada para el crecimiento de los cultivos. La captura de agua en un cultivo de soja es muy inferior a los restantes cultivos. Una soja temprana consumió entre el 36 y 41% del agua que le llueve mientras que un maíz o un doble cultivo trigo/soja o trigo/maíz puede alcanzar entre 60 a 70% de la precipitación anual. Caviglia *et al.* (2004) mencionan valores de captura de agua para soja entre 0,28 y 0,51 y para la secuencia trigo/soja de 0,54 a 0,71. Estos resultados son similares a los hallados en este trabajo.

Los resultados muestran que en la mayoría de los casos no hubo diferencias en el consumo de agua, rendimiento en grano, captura de agua y EUA para soja y maíz creciendo en distintas secuencias de cultivos. Esto puede deberse a que las simulaciones se diseñaron con fechas de siembras fijas las cuales fueron respetadas independientemente de la secuencia de cultivos. Esto podría ocasionar que el ambiente climático explorado por un cultivo sea similar en algunas secuencias. Por ende, sería esperable que no haya diferencias significativas entre las variables analizadas tal como lo observado en maíz temprano en Río Cuarto y soja temprana para ambos lugares. En el caso de los cultivos de segunda, sería importante flexibilizar la fecha de siembra en función de la duración del período de crecimiento de trigo. Esto podría mostrar algunas ventajas en el crecimiento de los cultivos de segunda que no pudieron analizarse en este trabajo.

Tabla 14. Precipitación anual, consumo de agua y captura de agua para los cultivos de maíz, soja, trigo/soja de segunda, y trigo/maíz de segunda para Laboulaye y Río Cuarto en distintas secuencias de cultivos.

	Laboulaye			Río Cuarto		
	Precipitación anual (mm)	Consumo de Agua (mm)	Captura de Agua (adim.)	Precipitación anual (mm)	Consumo de Agua (mm)	Captura de Agua (adim.)
Maíz						
<u>S-M</u>	873a	602a	0,73a	795,50a	425,01b	0,57b
T/M-M	873a	581a	0,70a	795,50a	513,20a	0,69a
T/S-M	873a	572a	0,69a	795,50a	513,53a	0,69a
Promedio	873A	585A	0,70A	795,50A	483,91B	0,65A
Soja						
<u>S-M</u>	919a	354a	0,4a	844,30a	263,77b	0,32b
<u>S-S</u>	896a	353a	0,42a	819,90a	264,46b	0,34b
T/S-S	873a	311b	0,38a	795,50a	320,34a	0,43a
T/M-S	8723a	355a	0,43a	795,50a	269,41b	0,36b
Promedio	891A	345B	0,41B	815,02A	276,49C	0,36B
Trigo/Soja de segunda						
<u>T/S</u>	896a	587a	0,69a	819,90a	481,07a	0,61a
<u>T/S-M</u>	919a	553b	0,63a	844,30a	477,72a	0,58a
<u>T/S-S</u>	919a	578ab	0,66a	844,30a	479,16a	0,58a
Promedio	907A	576A	0,67A	832,10A	479,76B	0,60B
Trigo/Maíz de segunda						
<u>T/M-M</u>	919a	549b	0,63a	844,30a	514,06a	0,63a
<u>T/M-S</u>	919a	590a	0,68a	844,30a	515,79a	0,63a
Promedio	919A	570A	0,65A	844,30A	514,93A	0,63A

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre secuencias para un mismo cultivo y letras distintas mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivos, ambos para un mismo lugar. Tukey ($p < 0,05$). La línea subrayada indica al cultivo que se refiere el dato.

En los cultivos tempranos, los consumos de agua de maíz y soja son notablemente diferentes siendo muy superior para maíz (60 y 64% para Río Cuarto y Laboulaye, respectivamente). Sin embargo, en los cultivos de segunda se observó una diferencia en el consumo de agua mucho menor para ambos cultivos (11 y 1,4% para Río Cuarto y Laboulaye, respectivamente). A su vez, las diferencias de rendimiento en grano fueron también menores. La diferencia de rendimiento en grano fue mayor entre maíz temprano y de segunda (45 y 55% para Río Cuarto y Laboulaye, respectivamente) en comparación a soja temprana y de segunda (27 y 32% para Río Cuarto y Laboulaye, respectivamente). Esto indicaría que ante situaciones de déficit hídrico para un cultivo de segunda, es más conveniente sembrar soja dado que se tiene una pérdida de rendimiento en grano menor en comparación a maíz. No obstante, ante situaciones donde la disponibilidad de agua no sea una limitante es preferible maíz en comparación de soja dado que la pérdida de rendimiento de grano por atraso de la fecha de siembra es menor.

El consumo de agua y la EUA mostraron diferencias entre Laboulaye y Río Cuarto para ambos cultivos tanto temprano como de segunda. El consumo de agua siempre fue mayor en Laboulaye mientras que la EUA siempre fue menor. El consumo de agua en Laboulaye puede ser mayor debido a la mayor cantidad de agua disponible durante el ciclo de los cultivos comparado con Río Cuarto. Además, el DPV en Laboulaye fue mayor que en Río Cuarto, este factor meteorológico afecta notablemente la demanda atmosférica en zonas subhúmedas a semiáridas ocasionando que la EUA aumente con la disminución del DPV (Zwart & Bastiaanssen, 2004).

En síntesis, los resultados del comportamiento de los cultivos simulados muestran que el consumo y la captura de agua de maíz y los doble cultivos trigo/soja y trigo/maíz fueron muy superiores a los de soja. También se encontró que el rendimiento en grano, el consumo de agua y la EUA de los cultivos tempranos fue superior a los de segunda, tanto en maíz como soja. Por consiguiente, el ordenamiento temporal de los cultivos de soja y maíz afectó la capacidad con que ambos cultivos usan el agua de lluvia. Finalmente es importante destacar que el consumo de agua de los cultivos siempre fue superior en Laboulaye mientras que la EUA fue siempre mayor en Río Cuarto.

III.2.2. Resultados de las simulaciones de las Secuencias de Cultivos

La Tabla 15 muestra la precipitación, consumo de agua y las variables asociadas a la PA de las secuencias de cultivos simulados para Laboulaye y Río Cuarto. El consumo de agua se incrementó un 58% cuando se pasa de monocultivo de soja a una rotación trigo/soja en Laboulaye. Por otra parte, en Río Cuarto el consumo de agua se incrementó de 25 a 60% en promedio a medida que se pasa de un cultivo por año a tres cultivos cada 2 años. La secuencia de cultivo T/M-M mostró el mayor incremento en el consumo de agua con respecto a S-S en Río Cuarto. En general existió una tendencia a incrementar el consumo de agua a medida que aumenta la intensidad de las secuencias de cultivos en Laboulaye (Tabla 16). La secuencia de cultivo con mayor índice de intensidad (T/S) mostró un mayor consumo de agua en las condiciones ambientales de Laboulaye (Tabla 15). Sin embargo, en Río Cuarto los mayores incrementos en el consumo de agua fueron logrados con secuencias de cultivos de moderada intensidad (T/M-M y T/S-M). En esta localidad, la menor cantidad de lluvia anual podría explicar el menor consumo de agua de la secuencia T/S. El análisis del incremento del consumo de agua en función del grado de intensidad y diversidad de la secuencia de cultivo (Tabla 16), mostró una relación más ajustada entre las variables pero sin significancia estadística en la mayoría de los casos. En general, las secuencias de cultivos con un alto grado de intensificación y diversidad, sin llegar al máximo, son

las que más incrementan el consumo de agua. También, se observó que las secuencias que incluyen maíz o trigo tienen un aumento en el consumo de agua superior a los que no tienen gramíneas (Tabla 16). Caviglia *et al.* (2013) obtuvo consumos de agua similares, a los hallados en este trabajo, en un estudio de simulación de las secuencias T/S y T/S-M en las condiciones ambientales de Balcarce (Argentina).

Tabla 15. Precipitación, consumo de agua, captación de agua, EUA y PA para las secuencias de cultivos simuladas en Laboulaye y Río Cuarto.

	Precipitación (mm)	Consumo de agua (mm)	Captura de agua (adim.)	EUA		PA	
				Grano (g m ⁻² mm ⁻¹)	Glucosa	Grano (g m ⁻² mm ⁻¹)	Glucosa
Laboulaye							
S-S	1791aA	707dA	0,41cA	0,77f	0,44fB	0,31f	0,18fB
S-M	1791aA	956cA	0,55bA	1,55b	1,19bB	0,85cd	0,65cA
T/S-M	1803aA	1123bA	0,64aA	1,50b	1,16bB	0,96b	0,74bA
T/S-S	1803aA	933cA	0,53bA	0,93e	0,61eB	0,50e	0,33eA
T/M-M	1787aA	1130bA	0,65aA	1,76a	1,42aB	1,14a	0,92aB
T/M-S	1803aA	943cA	0,54bA	1,27c	0,94cB	0,68d	0,51dA
T/S	1803aA	1172aA	0,67aA	0,99d	0,70dB	0,67c	0,47dA
Río Cuarto							
S-S	1622aA	529fB	0,33cB	1,08f	0,61fA	0,36e	0,20fA
S-M	1622aA	688dB	0,43bB	2,01b	1,49bA	0,87c	0,63cA
T/S-M	1622aB	819bB	0,52aB	1,94b	1,50bA	1,00b	0,77bA
T/S-S	1622aB	661eB	0,42bB	1,17e	0,76eA	0,49d	0,32eA
T/M-M	1622aA	849aB	0,54aB	2,36a	1,89aA	1,26a	1,01aA
T/M-S	1622aB	691dB	0,43bB	1,72c	1,27cA	0,75c	0,56cA
T/S	1622aB	795cB	0,50aB	1,24d	0,85dA	0,62c	0,43dA

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre secuencias de cultivos para un mismo lugar y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas para una misma secuencia y lugares distintos. Tukey (p < 0.05).

El rendimiento en grano no mostró una tendencia clara con respecto a la intensidad de la secuencia de cultivo (Tabla 16). Esta relación se hizo más notable con el incremento de la diversidad de secuencia de cultivos pero sin sustento estadístico. Sin embargo, la proporción de maíz, en primer lugar, y la proporción de gramíneas, en segundo; explicaron el rendimiento en grano de las secuencias de cultivos analizadas (p < 0,05). En ambas localidades, las secuencias de cultivos con mayor rendimiento anual fueron T/M-M y T/S-M (Tabla 17). El menor rendimiento en grano fue obtenido con las secuencias S-S y T/S-S. En las secuencias que tienen maíz y trigo, ambos cultivos explicaron el incremento del rendimiento en grano y la variabilidad de rendimiento del sistema (Tabla 16). En general, todas las secuencias de cultivos obtuvieron mayor rendimiento en Laboulaye, a excepción de S-S (Tabla 17). Según Caviglia & Sadras (2004) los sistemas de cultivos que menor rendimiento en grano obtuvieron en el sudeste de la pampa argentina (Balcarce) son T/S y T/S-S (ellos no evaluaron la secuencia de cultivo S-S) mientras que Caviglia *et al.* (2013) concluyen que las secuencias T-M y T/S-M son las que mayor

rendimiento en grano mostraron para las condiciones ambientales del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Por el contrario, las secuencias con menor rendimiento en grano fueron T/S-S y T-S.

Algunos trabajos mencionan que el rendimiento anual se incrementa de 10 a 28% con el aumento del índice de intensificación (Caviglia & Sadras, 2004). Estos resultados no permiten apoyar esta afirmación pero si es posible concluir que el mayor rendimiento en grano se obtuvo con una intensidad de cultivo intermedia (IIS = 1,5) y una diversidad intermedia-alta. El rendimiento en grano se vio más favorecido por el incremento de la proporción de maíz en ambos lugares. Estas secuencias pueden verse beneficiadas por una mayor diversidad de cultivos que favorece el sinergismo o el “efecto rotación”, donde los cultivos rotados generalmente incrementan su rendimiento de granos comparado con las monoculturas (Porter *et al.*, 1997). Un ejemplo de ello lo brinda Anderson (1998) donde menciona que el incremento de la diversidad de cultivos y el sinergismo puede mejorar el uso de la precipitación del sistema de cultivo de 42% para sistemas trigo-barbecho a 65% para trigo-maíz-girasol-barbecho o trigo-maíz-mijo-barbecho. En este estudio, el “efecto rotación” no es contemplado por SWB ya que simula el crecimiento del cultivo en función de la disponibilidad de radiación solar y agua. En consecuencia, las interacciones que podrían originarse entre cultivos en una rotación no son tenidos en cuenta.

Tabla 16. Grado de Ajuste (R_2) de la regresión entre las variables agronómicas y el índice de intensidad (IIS), índice de diversidad (ID), Proporción de Gramíneas (PG) y proporción de Maíz (PM) de las secuencias de cultivo para Laboulaye y Río Cuarto.

Lugar	Variable	IIS	ID	PG	PM
Laboulaye	Consumo de Agua	0,57*	0,65 ns	0,73**	0,18 ns
	Rendimiento en Grano	0,04 ns	0,45 ns	0,62**	0,78**
	C _{agua}	0,55*	0,63 ns	0,74**	0,19 ns
	EUA	0,02 ns	0,49 ns	0,49**	0,89***
	PA	0,04 ns	0,45 ns	0,69**	0,78**
Río Cuarto	Consumo de Agua	0,48 ns	0,55 ns	0,85***	0,36 ns
	Rendimiento en Grano	0,20 ns	0,42 ns	0,66*	0,89***
	C _{agua}	0,48 ns	0,53 ns	0,84**	0,35 ns
	EUA	0,19 ns	0,47 ns	0,46**	0,94***
	PA	0,20 ns	0,42 ns	0,66*	0,89***

* Indica nivel de significancia estadística $p < 0.1$. ** Indica nivel de significancia estadística $p < 0.05$. *** Indica nivel de significancia estadística $p < 0.01$. ^{ns} Indica ausencia de significancia estadística.

III.2.3. Captura de Agua de las Secuencias de Cultivos

La captura de agua de las secuencias de cultivos más intensas y diversas fue mayor que el agua consumida por un solo cultivo por año (Tabla 15). Los sistemas de cultivos T/S, T/S-M y T/M-M tuvieron una captación de agua superior a las restantes secuencias en ambas localidades. No obstante, las secuencias de cultivo simuladas en las condiciones ambientales de Laboulaye captaron en promedio 20% más agua que las de Río Cuarto. En Laboulaye, las secuencias de cultivos señaladas anteriormente usaron un 65% del total de agua disponible por precipitación mientras que en Río Cuarto usaron en promedio un 52% (Tabla 15). La captación de agua de la secuencia S-S y S-M fue 36,5 y 16,3% inferior en comparación a los demás sistemas de cultivos. La fracción de captación de agua se incrementó de 0,37 a 0,49 en un solo cultivo por año a 0,59 y 0,58 con tres cultivos cada 2 años y el doble cultivo anual, respectivamente. La fracción de captación de agua disminuyó a medida que se incrementó la participación de soja en la secuencia de cultivo (Tabla 16). Por ejemplo, en el sistema T/M-M, C_{agua} varió entre 0,54 y 0,65 a 0,33 y 0,41 en la secuencia S-S, para Río Cuarto y Laboulaye respectivamente. Estos resultados coinciden con los reportados en la bibliografía para las secuencias T/S y T/S-S (Caviglia *et al.*, 2013).

Tabla 17. Rendimiento en grano y glucosa simulado para diferentes secuencias de cultivos en Laboulaye y Río Cuarto.

	n	Laboulaye			Río Cuarto		
		Rendimiento en grano	Rendimiento en glucosa	C.V.*	Rendimiento en grano	Rendimiento en glucosa	C.V.*
		(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(%)	(g m ⁻²)	(g m ⁻²)	(%)
S-S	24	543f	309gB	7,3	569g	324gA	6,9
S-M	24	1481c	1134cA	7,6	1383c	1023cB	6,5
T/S-M	24	1685b	1304bA	7,4	1587b	1228bB	5,1
T/S-S	24	866e	570fA	6,2	775f	501fB	7,2
T/M-M	24	1993a	1600aA	7,9	2000a	1608aA	7,3
T/M-S	24	1685d	886dA	3,6	1189d	882dA	10,1
T/S	24	1164d	815eA	4,1	984e	680eB	6,6

* C.V.: Coeficiente de Variación. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre secuencias de cultivos para un mismo lugar y letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas para una misma secuencia y lugares distintos. Tukey ($p < 0.05$). n: número de datos.

En general, existió una tendencia positiva a incrementar la captación de agua cuando la intensidad y diversidad de la secuencia de cultivo aumentó hasta un punto óptimo, dado que un solo cultivo por año usa solamente una pequeña proporción de los recursos potencialmente disponibles pero no es estadísticamente significativa (Tabla 16). Sin embargo, la proporción de gramíneas está fuertemente relacionada con la C_{agua} ($p < 0,05$). Caviglia *et al.* (2004) indican que el consumo de agua de un solo cultivo de trigo, maíz o soja varía en un rango de 400 a 600 mm durante su estación de crecimiento. Esto representa una C_{agua} (en base anual) de 0,31 a 0,39 para

trigo y soja respectivamente, mientras que en la secuencia T/S la captación supera el 62% de la precipitación (Caviglia *et al.*, 2004) siendo similar a los hallados en este trabajo. Villar & Cencig (2010) mencionan que la captación de agua de un cultivo anual varía entre 0,39 a 0,65 mientras que un doble cultivo puede incrementar la captura a 0,64 a 0,9 para varias secuencias de cultivos.

El valor de C_{agua} cambió según la magnitud de la precipitación siendo menor a medida que esta incrementa y viceversa ($p < 0,05$). La C_{agua} con lluvias menores a 800 mm alcanza valores entre 0,63 y 0,73 para las secuencias S-M, T/S-M y T/M-M en Laboulaye mientras que en Río Cuarto es 0,49 y 0,6, para las mismas secuencias. Con más de 800 mm la C_{agua} varía entre 0,5 y 0,6 para las mismas secuencias en Laboulaye y 0,37 y 0,46 en Río Cuarto. Este comportamiento puede ser explicado porque el consumo de agua varió en una proporción menor en comparación a los cambios que ocurren con la lluvia. Es decir, en ciclos de cultivo donde la lluvia es menor a la situación normal, el consumo de agua se reduce pero a una tasa menor que la lluvia en consecuencia la C_{agua} es mayor a una situación normal. En el caso contrario, cuando la precipitación es mayor a lo normal el consumo de agua se incrementa pero a una tasa menor que la lluvia resultando en una C_{agua} menor a una situación normal. Además, cuando se incrementa el IIS las transferencias de agua (escurrimiento y drenaje profundo) se reducen en comparación con secuencias con un menor IIS (Caviglia *et al.*, 2013).

Según Sadras & Roget (2004), la elección de los sistemas de cultivos no afectan la ET_C pero tienen un impacto significativo en la relación T/ET_C incrementándose cuando la rotación de cultivo es más intensa. Esta mejora en el uso del agua con la intensificación de cultivo puede deberse a una reducción en el tiempo de barbecho (Farahani *et al.*, 1998). Aproximadamente un 60% de la precipitación recibida durante el período de barbecho es perdida por evaporación y/o percolación (Tanaka *et al.*, 2005). Según Steiner (1994), la evaporación durante el período de barbecho representa 36, 48 y 61% de la precipitación total para sistemas de cultivos de trigo continuo, trigo-sorgo-barbecho y trigo-barbecho, respectivamente. En consecuencia, los sistemas de cultivos de secano con menor período de barbecho por unidad de tiempo (y por ende mayor IIS) puede ser una estrategia para hacer un uso más eficiente de la precipitación y reducir la evaporación durante este período (Peterson *et al.*, 1996).

III.2.4. Eficiencia de Uso del Agua de las Secuencias de Cultivos

La eficiencia de uso del agua (EUA) para el rendimiento en grano varió considerablemente entre secuencias de cultivos (Tabla 15). En ambas localidades, la secuencia T/M-M fue la que logró mayor EUA ($1,65 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$). Por el contrario, los sistemas de cultivo S-S fueron las de

menor EUA siendo 0,44 y 0,61 g m⁻² mm⁻¹ para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente. Las secuencias S-M y T/S-M tuvieron una EUA 13% inferior al sistema T/M-M. A medida que se incrementó la proporción de soja en la rotación (0 en la secuencia T/M-M a 1 en S-S), la EUA disminuyó linealmente para ambas localidades ($p < 0,05$, Tabla 16). La EUA se reduce 53,6 y 56,2% entre los sistemas T/M-M y S-S. La proporción de maíz fue la variable que explica en mayor medida la EUA de las secuencias de cultivos ($p < 0,001$).

La intensidad y la diversidad de cultivo no mostraron una relación clara con la EUA (Tabla 16). La Tabla 18 muestra que las secuencias con un IIS = 1,5 y una participación de soja $\leq 50\%$ (T/M-M y T/S-M) tuvo una EUA superior al resto de las secuencias de cultivos (110,7% superior a la S-S). Por el contrario, la secuencia S-M tuvo una EUA 94,19% superior en relación a la S-S. El doble cultivo T/S (IIS = 2) tuvo una EUA superior (42% superior a S-S) a soja pero menor a las restantes secuencias de cultivos. Estos resultados no coinciden con los reportados por Sadras & Roget (2004), los mismos mencionan que la intensificación de cultivos puede incrementar la EUA. En esta tesis, tampoco se encontró una relación clara entre la EUA y los cambios en el régimen de lluvia. En general, la EUA tendió a mantenerse constante a medida que la precipitación se incrementa.

III.2.5. Productividad del Agua de las Secuencias de Cultivos

La PA se incrementó de 0,18-0,63 a 0,32-1,01 g m⁻² mm⁻¹ en secuencias de un solo cultivo por año a secuencias de tres cultivos en 2 años (Tabla 15). La secuencia T/M-M logró la mayor PA (0,92 y 1,01 g m⁻² mm⁻¹ para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente) mientras que T/S-M sigue con 0,92 y 0,95 g m⁻² mm⁻¹ para ambas localidades. La PA de la secuencia T/S fue superior a la S-S pero inferior a la T/M-M y T/S-M. Las restantes secuencias tuvieron una menor PA que las secuencias anteriormente mencionadas. La PA disminuyó fuertemente a medida que se incrementó la participación de soja en la secuencia de cultivo ($p < 0,05$, Tabla 16). Por el contrario, cuando aumentó la participación de gramíneas, y en especial maíz, en la rotación la PA se incrementó. Este hallazgo es similar a lo mencionado por Nielsen *et al.* (2005) y Miller *et al.* (2003) quienes mencionan que las rotaciones con cultivos oleaginosos tienen una menor PA que los sistemas sin cultivos oleaginosos y, por el contrario, en rotaciones donde se incluye maíz, la PA aumenta (Huang *et al.*, 2003).

La alta PA en las secuencias de cultivos que incluyen maíz se debe principalmente a su metabolismo C4 que le confiere alta capacidad de fijación de dióxido de carbono por unidad de

agua transpirada y al menor contenido energético de la biomasa producida comparada con soja. Por el contrario, la menor PA de soja con respecto a maíz se debe a la baja eficiencia fotosintética de este cultivo y a la mayor concentración energética en los granos (Andrade, 1995). Además, los resultados muestran que la inclusión en el sistema del doble cultivo anual, (e.g. T/M ó T/S), en comparación con un solo cultivo por año, puede incrementar marcadamente la PA (Fukai, 1993); a pesar de que los cultivos de segunda reducen el rendimiento en grano considerablemente. Esto se debe a que el doble cultivo compensa el menor rendimiento y EUA del cultivo de segunda con una mayor C_{agua} .

Si se transforma la cantidad de grano producido en su equivalente de energía⁶ y se recalcula la EUA y PA en su equivalente correspondiente los resultados hallados en este estudio no difieren considerablemente (datos no mostrados). Transformando el rendimiento en grano en energía, solamente se logra reducir la brecha en EUA y PA entre los sistemas con mayor proporción de soja comparada con los que menos soja tienen en su secuencia siendo las secuencias T/M-M y T/S-M las de mayor EUA y PA. Esto indicaría que el metabolismo C4 es más importante que la calidad de los granos producidos por las secuencias analizadas.

En general, la PA fue superior en Río Cuarto en comparación con Laboulaye principalmente en las secuencias T/S-S, S-S y T/M-M siendo un 33,3, 13,9 y 10% superior en Río Cuarto en relación a Laboulaye, respectivamente. Esta mayor PA en los sistemas mencionados se debe a una mayor EUA. Si bien la C_{agua} en Laboulaye es superior a Río Cuarto (20,5%), la EUA tiene una diferencia mayor 24,24% a favor de Río Cuarto. En consecuencia, la PA resultó superior en Río Cuarto. Esto indicaría que cualquier práctica de manejo que permita mejorar la EUA de los cultivos permitiría un mejor uso del agua. Como se discutió anteriormente, el DPV es uno de los factores que modifica la EUA, en consecuencia, sería importante evaluar técnicas de cultivo que tiendan a reducir el DPV como e.g. intercultivo o cultivo en franja. Estos resultados también muestran que la mayor PA se logró en una situación con menor precipitación y un suelo con menor retención hídrica.

La PA se redujo con el incremento de la precipitación ($p < 0,05$). Esto es debido a que la PA de todas las secuencias de cultivos estuvo altamente relacionada con la captura de agua ($p < 0,05$). En ambas localidades, la PA respondió positiva y linealmente al incremento de la C_{agua} mostrando un aumento de 24,2 y 34,9% en la PA por cada 10% de incremento de C_{agua} para Laboulaye y Río Cuarto, respectivamente. Esto indicaría que para lograr una mayor PA de los sistemas de cultivos

⁶ Equivalentes energéticos 4,54; 4,55 y 5,53 kcal g⁻¹ para trigo, maíz y soja, respectivamente (Pasarela & Savín, 2003).

una alternativa podría ser trabajar en la relación ET_c /precipitación. En parte, este aumento en C_{agua} está relacionado a técnicas que ayuden a aumentar la infiltración y reducir la evaporación y/o a reducir el período de barbecho.

Tabla 18. Diferencia porcentual del consumo de agua, eficiencia de uso del agua (EUA) y productividad del agua (PA) de las secuencias de cultivos simuladas para Laboulaye y Río Cuarto respecto a la secuencia soja - soja.

	Δ Consumo de agua (%)	Δ EUA (%)	Δ PA (%)
Laboulaye			
S-M	35,3c	101,5b	145,1cd
T/S-M	59b	104,8b	195,5b
T/S-S	32,1c	33,1e	81,4e
T/M-M	59,9b	129,3a	247,6a
T/M-S	33,5c	64,8c	123,7d
T/S	65,8a	48,6d	150,1c
Río Cuarto			
S-M	30,1d	86,9b	143,3c
T/S-M	54,8b	80,4b	179,3b
T/S-S	25e	9,0e	36,6d
T/M-M	60,4a	119,1a	253,1a
T/M-S	30,6d	59,8c	110,5c
T/S	50,4c	15,1d	72,3c

Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre secuencias de cultivos para un mismo lugar. Tukey ($p < 0.05$).

En este sentido, teniendo en cuenta que en la región CSC se realiza una alta proporción de monocultivo de soja y el aporte de rastrojo y carbono de esta al suelo es escaso comparado con secuencias que incluyen gramíneas, difícilmente se logre alcanzar los objetivos planteados en el párrafo anterior (aumentar la infiltración y reducir la evaporación). Por el contrario, es muy probable que siguiendo con secuencias con una alta participación de soja se ingrese en un proceso de retroalimentación negativo y se obtenga una menor C_{agua} con el paso del tiempo.

En este sentido, el aumento de la tasa de infiltración puede ser lograda con técnicas de manejo de suelo, labranza y/o estructuras hidráulicas. En el primer caso, la inclusión de cultivos de cobertura pueden ayudar a mejorar la cobertura superficial del suelo y mejorar la estructura de los agregados superficiales para lograr una tasa de infiltración mayor (Cazorla *et al.*, 2009). Además, el aumento de la cobertura ayuda a reducir la temperatura superficial del suelo disminuyendo la evaporación (Alvarez, com. pers.). Las técnicas de labranza vertical (e.g. paratill o subsolador) pueden ser una herramienta útil para mejorar la infiltración en suelos con presencia

de compactaciones importantes. En condiciones con relieve más pronunciados a los de la región de estudio, el uso de terrazas de absorción puede ser una técnica de manejo que permita incrementar la captación de agua (Degioanni *et al.*, 2012) y mejorar la PA.

Varios trabajos señalan que la disminución del tiempo de barbecho permite incrementar la PA de los sistemas de cultivo en secano (Nielsen *et al.*, 2005). La longitud y el momento del barbecho afectan la cantidad de precipitación que cae sobre el suelo, y la cantidad de agua que es almacenada en el mismo. Esta cuantificación varía fuertemente de año a año, de cultivo a cultivo, y de un sistema de rotación a otro (Huang *et al.*, 2003; Tanaka *et al.*, 2005). Además, cuando el período de barbecho disminuye, el período de evaporación puede reducirse pudiendo incrementarse el uso del agua, y por ende, puede incrementarse el rendimiento del cultivo (Steiner, 1994). En este sentido, Pikul & Aase (1995) mencionan que la rotación puede afectar la disponibilidad de agua para el crecimiento de los cultivos por cambiar la tasa de evaporación. Estos autores corroboraron que el aumento de la cobertura de residuos sobre el suelo tiene un efecto positivo sobre el balance hídrico. Mantener altos niveles de cobertura conducen a una menor temperatura superficial del suelo y, por consiguiente una menor tasa de evaporación (Campbell & Norman, 1998; Sinclair & Bennett, 1998). Por otra parte, los rastrojos mejoran la condición superficial del suelo permitiendo una mayor tasa de infiltración (Gil, 2004; Álvarez & Barraco, 2005).

La EUA explicó en mayor medida ($r^2 = 0,93$; $p < 0,05$) la variación de la PA de las secuencias de cultivos simulados en comparación a la C_{agua} ($r^2 = 0,72$; $p < 0,05$). En general a medida que se incrementa en $0,1 \text{ g m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ la EUA, la PA aumenta un 6% para las condiciones ambientales de Río Cuarto. En este trabajo no se halló una respuesta entre el rendimiento en grano y la diversidad de las secuencias de cultivos estudiados. Posiblemente esto se deba a que SWB solamente afecta el rendimiento en grano del cultivo por la disponibilidad de radiación solar y agua sin tener en cuenta otros factores como el ciclado de nutrientes, la estructura y la comunidad microbiana del suelo o infestación de plagas las cuales inciden en el rendimiento en grano (Higgs *et al.*, 1990). Tampoco se hallaron efectos de sinergismo entre cultivos, a excepción de lo mencionado para soja, como los reportados en otros trabajos (Anderson, 2005a; Anderson, 2005b). Anderson (2005a), estudiando el comportamiento de los cultivos en ensayos de larga duración, notaron que la EUA de trigo es mayor en una rotación trigo-maíz-barbecho que con trigo-mijo-barbecho. En esta rotación, el trigo produce un 34% más de grano que con trigo-mijo-barbecho. En consecuencia, ellos hipotetizan que la presencia de maíz en la rotación mejora la EUA de trigo. Efectos similares fueron hallados en mijo cuando crecía en una rotación trigo-maíz-mijo en comparación con trigo-mijo (Anderson, 2005b). Algo similar fue informado para soja,

donde la EUA de soja se incrementa si el antecesor es maíz comparado con el antecesor soja, mientras que la EUA de maíz no es afectada por el cultivo previo (Porter *et al.*, 1997).

Esto muestra que la comparación de resultados de las secuencias de cultivos es algo complejo ya que las mismas son diferentes para las distintas partes del mundo (Huang *et al.*, 2003). Además, el estudio de la PA de sistemas de cultivos fue escasamente abordado por la comunidad científica (Pierce & Rice, 1988). No obstante, es posible delinear algunos puntos básicos sobre el efecto de la secuencia de cultivo sobre la PA. En general, el aumento en la intensidad de la secuencia de cultivos tiende a incrementar el consumo de agua mientras que el aumento de la proporción de gramíneas (Trigo y Maíz) aumenta la EUA y la PA. Trabajos realizados en Akron (CO) reportaron que la PA se incrementa cuando la intensidad de la secuencia de cultivos aumenta de un cultivo cada 2 años a 2 cultivos en tres años (incluyendo trigo, maíz y mijo) pero no cuando se incluye girasol en la rotación (Nielsen *et al.*, 2005).

Además, la secuencia de cultivo debe tener en cuenta el impacto sobre el recurso suelo. La degradación de la materia orgánica ocurre principalmente como consecuencia del rendimiento de cultivos anuales de cosecha en sistemas bajo prácticas de labranza con remoción. Por el contrario, la conservación de las condiciones originales de los suelos puede ser parcialmente lograda al implementar rotaciones y con el uso de sistemas de labranza de baja o nula remoción del suelo como la siembra directa (Quiroga *et al.*, 1999; Díaz Zorita *et al.*, 2000; Abril *et al.*, 2005). Una secuencia de cultivo intensa, que incluya una proporción de gramíneas importante, mejora significativamente el aporte de materia orgánica así como la macro estructura, micro agregación, y los agregados estables al agua, y decrece la dispersión. Además, aumenta la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica (Masri & Ryan, 2006). La siembra directa también afecta el contenido de materia orgánica y la estructura, y por lo tanto modifica la porosidad y la retención de humedad, estableciendo un nuevo comportamiento físico hídrico del suelo (Michelena, 2004; Álvarez & Barraco, 2005). Por ende, una mayor disponibilidad de agua permitiría aumentar la transformación del agua en biomasa dando como resultado mayores aportes de carbono orgánico (Gil, 2004). En consecuencia, se produciría un ciclo de retroalimentación positivo mejorando la dinámica del agua y la calidad del suelo.

No obstante, una duda común al diseñar una secuencia de cultivos es si el agua disponible es suficiente para satisfacer la demanda de todos los cultivos (Huang *et al.*, 2003). En consecuencia, la elección de los cultivos es mayormente afectada por la disponibilidad de agua, la cual generalmente es determinada por la condición ambiental local (Varvel, 1995). El objetivo de este estudio fue evaluar las secuencias de cultivos en función de los requerimientos hídricos de los

cultivos, el balance hídrico de los suelos y las características climáticas a fin de determinar cuál de las secuencias es más conveniente para mejorar el uso del agua. En este sentido, se determinó que la secuencia T/M-M, en primer orden, y T/S-M, en segundo orden, fueron las de mayor PA. Es necesario hacer la salvedad que dicha evaluación se realizó a través de la aplicación de un modelo de simulación de cultivo el cual contempla como factores limitantes la radiación solar, el agua y algunos factores antrópicos. También es importante destacar que la secuencia de cultivo predominante en la región CSC (S-S) es la que mostró menor PA siendo la de menor captura y EUA. Si a esto lo relacionamos con el deterioro de las funciones ambientales que fue mencionado por Cisneros *et al.* (1997), Bricchi & Cisneros (1998), y Titonell (2004), entre otros; es lógico pensar que la sostenibilidad del sistema agrícola predominante de la región CSC es inviable en el largo plazo.

Por tal motivo, es necesario analizar el efecto de otros factores como la eficiencia de uso de nutrientes, la evolución de la condición física, química y biológica del suelo; y la incidencia de plagas en el largo plazo para determinar su impacto sobre las secuencias de cultivos analizadas en este trabajo. Finalmente, destacamos que un uso más intenso y sustentable del suelo puede ayudar a aliviar la presión para producir alimentos, fibras y combustibles sobre ecosistemas menos productivos y ambientalmente frágiles.

IV. CONCLUSIONES

La hipótesis formulada en esta tesis propone que: *cambios en el ordenamiento temporal de los cultivos de soja y maíz modifican la PA mientras que aumentos en la intensidad y/o la diversidad de la secuencia de cultivos generan incrementos en la PA de lluvia en las condiciones ambientales de la región CSC*. Los resultados obtenidos en esta investigación permiten concluir que cambios en el orden de siembra causaron diferencias en el consumo de agua, rendimiento en grano, y EUA de soja y maíz. El maíz mostró ser más sensible a su posición en la secuencia de cultivo (maíz de primera en comparación a maíz de segunda) principalmente en el consumo de agua y rendimiento en grano sobre todo en Laboulaye más que Río Cuarto. En soja, el consumo de agua y el rendimiento en grano también fueron influenciados por el ordenamiento dentro de la secuencia de cultivo pero con una sensibilidad menor que maíz. La EUA se redujo aproximadamente un 20% para ambos cultivos cuando se pasa de un cultivo temprano a uno de segunda siendo más sensible el maíz en Laboulaye y la soja en Río Cuarto. En este sentido, es posible rematar que: **1) el maíz fue muy sensible al ordenamiento temporal en la secuencia de cultivo afectándose el consumo de agua, C_{agua} , EUA y PA siendo más notable en Laboulaye que en Río Cuarto. 2) el consumo de agua, C_{agua} , EUA y PA de soja se vieron menos afectados que en maíz, siendo Laboulaye menos sensible que Río Cuarto, en cuanto al ordenamiento temporal del cultivo.**

En cuanto a la segunda parte de la hipótesis, referida al impacto de la intensidad y diversidad de la secuencia de cultivos, los resultados obtenidos permiten concluir que esta afirmación se corrobora parcialmente. Esto es debido a que, si bien, a medida que se incrementa la intensidad de la secuencia de cultivos la PA de lluvia mejora, esto ocurre hasta una intensidad óptima (IIS = 1,5). Por encima de esa intensidad, el uso del agua de lluvia disminuye. Además, la mejora en el uso del agua de lluvia está directamente relacionada a la proporción de maíz presente en la secuencia de cultivos. En tal sentido, la PA fue mayor para las secuencias T/M-M y T/S-M en ambos lugares de estudio. Las secuencias con una intensidad de cultivo menor o mayor mostraron una menor PA. **Esto indicaría que para el CSC, con un régimen pluviométrico que oscila**

entre 600 a 1200 mm, el mejor aprovechamiento del recurso agua se logra con 3 cultivos cada 2 años.

La captura de agua de un solo cultivo anual de soja o maíz varió entre 0,36 a 0,65 y 0,41 a 0,7 para Río Cuarto y Laboulaye, respectivamente. Mientras que los dobles cultivos trigo/soja y trigo/maíz captaron entre 0,60 a 0,63 y 0,67 a 0,65 para ambas localidades, respectivamente. Estos resultados muestran que no hay diferencias en la proporción de agua usada anualmente entre un cultivo de maíz anual y el doble cultivo (T/S o T/M).

La relación entre la PA con la diversidad de las secuencias de cultivos no mostró una relación clara. Se evidencia una tendencia positiva, hasta un punto óptimo, entre la PA y una diversidad intermedia a alta con un componente de gramíneas importantes, especialmente maíz. En los componentes relacionados a la PA (rendimiento en grano, consumo de agua, captura de agua, y EUA), se observó una relación muy ajustada cuando se incrementó la PM en las secuencias. Las secuencias con mayor EUA y PA (T/M-M y T/S-M), si bien tienen un grado de diversidad intermedio a alto, tienen un componente de maíz importante. **Estos resultados indican que para las condiciones ambientales de la región CSC, la proporción de maíz, en primera grado, y la diversidad de la secuencia de cultivos, en segundo grado, afecta positivamente la PA.**

Otras consideraciones

También es válido destacar otros hallazgos que fueron encontrados en el estudio que no se relacionan directamente con la hipótesis formulada:

- La secuencia de cultivo más típica de la región CSC (S-S) es la que menos eficientemente utilizó el agua para la producción agrícola. Un cultivo de soja anual aprovechó entre 36 a 41% de la precipitación del año quedando, en consecuencia, entre un 59 a 64% de la lluvia sin aprovecharse. En cambio, un cultivo de maíz, trigo/soja o trigo/maíz usan entre un 40 a 70% de la lluvia anual mejorando considerablemente con respecto al monocultivo de soja.
- El consumo de agua, para todos los cultivos, siempre fue mayor en Laboulaye en comparación a Río Cuarto mientras que la EUA se comportó de manera inversa. El mayor consumo de agua puede ser atribuible a la mayor cantidad de lluvia registrada en Laboulaye y la presencia de un suelo con mayor capacidad de almacenaje. En cambio, la

mayor EUA de Río Cuarto puede deberse a un menor DPV durante el ciclo de crecimiento de los cultivos.

- En Laboulaye se observó una reducción importante en el consumo de agua, rendimiento en grano y EUA de maíz de segunda con respecto al temprano. En Río Cuarto se observó algo similar para soja pero de menor magnitud. Este comportamiento diferencial de ambos cultivos entre lugares indicaría que el maíz de segunda tiene mejor comportamiento en Río Cuarto en comparación a Laboulaye siendo opuesto en soja.
- El modelo SWB permitió estimar aceptablemente el rendimiento en grano y el consumo de agua de las secuencias de cultivos planteadas en el estudio y evaluar el impacto de cambios en el ordenamiento temporal, la intensidad y diversidad de las secuencias de cultivos sobre el uso del agua de lluvia en la región CSC. El enfoque metodológico y las tareas realizadas en la adaptación, parametrización, calibración y corroboración de SWB constituyen un aporte para futuras investigaciones que se realicen con modelos de simulación. Además, la adaptación realizada al modelo SWB permitió simular secuencias de cultivo satisfactoriamente.
- Específicamente, se puede concluir que los parámetros k_b y e fueron los más importantes para ajustar la simulación de la acumulación de biomasa y rendimiento en grano de SWB mientras que para ajustar la cantidad de agua consumida por el cultivo fueron más importantes los parámetros k y *duración foliar*.

Sintetizando, las secuencias que mayor PA tuvieron en las condiciones ambientales de la región CSC fueron las que incluyen tres cultivos cada dos años y tienen un componente de gramíneas importante ($PG \geq 1$ entre trigo y maíz). La forma de aumentar esta PA es incrementando la intensidad de la secuencia y la proporción de gramíneas, y especialmente maíz; tendiendo a mejorar la Captura de Agua y la EUA. Finalmente, es preciso destacar que los sistemas agrícolas actuales de la región CSC, con un alto predominio de soja, tienen un grado de aprovechamiento del agua muy bajo comparado con otras secuencias de cultivos alternativas.

Futuras líneas de investigación:

Este estudio aportó un análisis básico del uso del agua y la cuantificación de la PA de las secuencias de cultivos comunes de la región CSC. Es importante continuar con los estudios sobre el tema y generar conocimientos más específicos. Las futuras líneas de investigación pueden direccionarse sobre dos grandes temas:

a. Uso del agua por secuencias de cultivos

Los estudios sobre la dinámica del agua en las secuencias de cultivos se deberían direccionar hacia la evaluación del impacto de diferentes prácticas de manejo de suelo (manejo de residuos, cultivos de cobertura, manejo del relieve como e.g. terrazas, etc.) y cultivo (cultivos alternativos, fertilización, densidad de siembra, riego, intercultivos, etc.) sobre el uso y productividad del agua. También se debería abordar estudios más específicos que involucren evaluar el efecto del cultivo antecesor en la disponibilidad de agua de un cultivo o analizar la cantidad de agua transferida por evaporación del suelo en una secuencia barbecho-cultivo de cosecha versus una cultivo de cobertura - cultivo de cosecha.

Al respecto, sería interesante evaluar el potencial de crecimiento de maíz tardío en las condiciones ambientales de Río Cuarto y Laboulaye en donde no haya condiciones limitantes para el crecimiento. En función de los resultados obtenidos en este estudio, es esperable que al atrasar la fecha de siembra de maíz, el consumo de agua se mantenga, pero se incremente la EUA. La captación de agua se mantendría constante y aumentaría si se incluye un cultivo de cobertura, mejorando la captación y por ende la PA. Sería relevante analizar cómo se comporta la secuencia cultivo de cobertura | maíz tardío en distintos ambientes climáticos y edáficos con el objetivo de determinar: ¿en qué condiciones es conveniente aplicar esta estrategia de cultivos? y ¿Cuánto se podría mejorar el manejo del agua (captación y EUA)?

En soja, es importante analizar cómo afectan el consumo de agua los distintos grupos de madurez usados en la zona de estudio. La sensibilidad fotoperiódica de los distintos grupos de madurez modifican la longitud del período de crecimiento de los cultivos y algunas características morfológicas de las plantas (e.g. la profundidad de enraizamiento). En consecuencia es esperable que sojas de grupos más largos que exploran un período de crecimiento mayor tengan una captación y EUA mayor que grupos más cortos.

En este estudio se halló que la inclusión de cultivos invernales, especialmente trigo, puede mejorar la PA de las secuencias de cultivos. En consecuencia, es necesario profundizar el estudio del comportamiento de otros cultivos invernales como e.g. cebada, colza, coriandro, garbanzo,

arveja, entre otros. La posibilidad de hallar un cultivo con una longitud del período de crecimiento menor a trigo y/o con un consumo hídrico más eficiente ayudaría a mejorar la PA e permitir intensificar más la secuencia de cultivo. También es necesario evaluar el uso de intercultivos (e.g. maíz – soja) como una forma de alterar el DPV en virtud de mejorar la EUA de ambos cultivos. Esta práctica puede ser interesante sobre todo en sistemas bajo riego.

En este estudio se evaluó el uso del agua y la PA de las secuencias de cultivos enfocadas desde un punto de vista físico. Sin embargo, es muy importante abordar este mismo estudio desde una visión económica. En un marco de producción sustentable, una empresa agropecuaria que basa su actividad agrícola en secuencias de cultivos que optimice el uso de recursos (en este caso el agua) también debe hacerlo desde un enfoque económico. Es decir, es necesario evaluar cuál es la secuencia de cultivo que más renta marginal genera por mm de agua usado. Este análisis puede arrojar resultados totalmente opuestos a los hallados en este estudio ya que los ingresos y costos generados por las secuencias de cultivos difieren notablemente entre sí.

b. Modelos de simulación de cultivos

El ajuste conseguido con SWB para la simulación del rendimiento y la dinámica del agua en el suelo fueron muy buenas. No obstante, para realizar estudios que requieran evaluar la acumulación de biomasa durante la estación de crecimiento del cultivo es necesario hacer una parametrización y calibración más específica para los cultivos de trigo, soja y maíz. También es necesario seguir calibrando SWB para otros cultivos que pueden incluirse en las secuencias de cultivos de la zona CSC como e.g. sorgo, girasol, cebada, colza, y maní.

De este estudio se destacan algunas posibilidades de mejora para perfeccionar la modelación de los cultivos. En primer lugar, si bien SWB simuló aceptablemente la acumulación de biomasa, hay una sobreestimación en las etapas iniciales del cultivo y una tendencia a subestimar en las etapas finales que deben ser corregidas para mejorar su capacidad predictiva. En segundo lugar, es necesario analizar la causa de la subestimación de la simulación del contenido hídrico del suelo en situaciones con humedad por encima de capacidad de campo. En tercer lugar, es necesario analizar la sensibilidad de los parámetros transpiración máxima, potencial hídrico a cierre estomático y marchitez sobre el consumo de agua del cultivo a fin de determinar el grado de importancia de estos en la calibración del modelo.

También es posible seguir desarrollando SWB para poder realizar estudios más complejos sobre la PA. SWB considera la acumulación de biomasa y rendimiento en función de la

disponibilidad de luz y agua. Sin embargo, la PA puede ser afectada notablemente por varias prácticas de manejo de cultivo y suelo (Hatfield *et al.*, 2001). Las prácticas de labranza que alteran los componentes del suelo o la superficie del mismo pueden afectar la disponibilidad de agua y nutrientes, y tener impacto en términos de la PA (de Santa Olalla Mañas *et al.*, 2005). A su vez, el manejo de la densidad de cultivo y la fertilización tienen efectos importantes en la PA (Lopez-Bellido *et al.*, 2000). Si bien, las simulaciones para trigo, soja y maíz mostraron un grado de ajuste aceptable, la carencia de un sub-modelo de degradación de residuos y balance de nitrógeno, y la imposibilidad de simular distintas densidades de siembra limita la posibilidad de evaluar el impacto de estas prácticas en la PA.

Específicamente, es necesario trabajar en mejorar las posibilidades de simulación de soja. En SWB no se toma en cuenta la sensibilidad fotoperiódica de soja y no se calibró para distintos grupos de madurez. En estudios más específicos sobre soja es sumamente necesario considerar esta limitante. También se debe trabajar en flexibilizar la fecha de siembra para lograr mejorar la modelación de cultivos de segunda. Sería útil tener funciones condicionales para desencadenar la siembra del cultivo como consecuencia de una o varias variables. Por ejemplo, un cultivo de segunda se siembra luego de que el cultivo antecesor fue cosechado o bien un cultivo no se siembra hasta que la capa superficial del suelo no tenga el contenido hídrico óptimo.

- Aase, J.K. & Reitz, L.L., 1989. Conservation production systems with and without grass barriers in the northern Great Plains. *J. Soil Water Conserv.* 44, 320-323.
- 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.
- Abril, A., Salas, P., Lovera, E., Kopp, S. & Casado-Murillo, N., 2005. Efecto acumulativo de la siembra directa sobre algunas características del suelo en la región semiárida central de la Argentina. *Ci. Suelo (Argentina)* 23, 179-188.
- Adekalu, K.O. & Fapohunda, H.O., 2006. A numerical model to predict crop yield from soil water deficit. *Biosystems Engineering* 94, 359-372.
- Albrizio, R. & Steduto, P., 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. *Agric. For. Meteorol.* 130, 254-268.
- Álvarez, C. & Barraco, M., 2005. Efecto de los sistemas de labranzas sobre las propiedades edáficas y rendimiento de los cultivos. En: Villegas, I.-E.G. (Ed.), *Boletín Técnico N° 4*, Gral. Villegas, Argentina, pp. 5-17.
- Allen, L.H., Jr., Pan, D., Boote, K.J., Pickering, N.B. & Jones, J.W., 2003. Carbon Dioxide and Temperature Effects on Evapotranspiration and Water Use Efficiency of Soybean. *Agron. J.* 95, 1071-1081.
- Allen, R., Pereira, L., Roes, D. & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO - Irrigation and Drainage, Roma, Italia.
- Angeli, A. 2014. Modelos Zonales de Producción en el Movimiento CREA. Región Centro. En: AACREA. *Soja: Claves para una Producción Rentable y Sostenible*. Ciudad de Buenos Aires, Argentina.
- Anderson, R.L., 1998. Designing rotations for a semiarid region., *Proc. Annu. Colorado Conserv. Tillage Assoc. Meet.* 10th, Sterling, CO.
- Anderson, R.L., 2005a. Are Some Crops Synergistic to Following Crops? *Agron. J.* 97, 7-10.
- Anderson, R.L., 2005b. Improving sustainability of cropping systems in the Central Great Plains. *J. Sustain. Agric.* 26, 97-114.
- Andrade, F., Aguirrezábal, L.A. & Rizalli, R.H., 2002. Crecimiento y rendimiento comparado. En: Andrade, F. & Sadras, V. (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA INTA Balcarce - F.C.A. U.N.M.P., Balcarce, Argentina, pp. 57-96.
- Andrade, F., Uhart, S.A. & Cirilo, A.G., 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crop Res.* 32, 17-25.
- Andrade, F.H., 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crop Res.* 41, 1-12.

- Andrade, F.H. & Cirilo, A.G., 2002. Fecha de siembra y rendimiento de los cultivos. En: Andrade, F.H. & Sadras, O. (Eds.), Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Producciones Gráficas Sirio, Balcarce, Argentina, pp. 137-156.
- Andrade, F.H. & Sadras, O., 2002. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade, F.H. & Sadras, O. (Eds.), Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Producciones Gráficas Sirio, Balcarce, Argentina, pp. 175-210.
- Andriani, J.M., Andrade, F.H., Suero, E.E. & Dardanelli, J.L., 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. 1. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11, 737-746.
- Angus, J.F. & van Herwaarden, A.F., 2001. Increasing Water Use and Water Use Efficiency in Dryland Wheat. *Agron. J.* 93, 290-298.
- Apezteguia, H., Andriulo, A., Salas, H.P., Lovera, E. & Sereno, R., 2004. Simulación de la dinámica de la materia orgánica en suelos del centro de la provincia de Córdoba con el modelo AMG. Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Argentina.
- Bainotti, C.T., Frascina, J., Salines, J., Alberione, E., Gómez, D., Donaire, G., Nisi, J., Masiero, B., Conde, B., Cuniberti, M., Mir, L., Macagno, S. & Berra, O., 2008. Evaluación de cultivares de trigo en la EEA Marcos Juárez campaña 2007/2008. En: Juárez, E.I.M. (Ed.), Trigo. Actualización 2008. Informe de Actualización Técnica n° 8.
- Bainotti, C.T., Frascina, J., Salines, J., Alberione, E., Gómez, D., Donaire, G., Nisi, J., Masiero, B., Conde, B., Cuniberti, M., Mir, L., Macagno, S. & Berra, O., 2009. Evaluación de cultivares de trigo en la EEA Marcos Juárez Campaña 2008/09. En: Juárez, I.E.M. (Ed.), Trigo. Actualización 2009. Informe de Actualización Técnica n° 11.
- Baumhardt, R.L., Lascano, R.J. & Evett, S.R., 2004. Soil Material, Temperature, and Salinity Effects on Calibration of Multisensor Capacitance Probes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1940-1946.
- Beltrame, M., 2013. Efectos del centeno (*Secale cereale* L.) como cultivo de cobertura en el consumo de agua y la producción de materia seca del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). p. 31. Tesina de Grado. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Bellocchi, G., Silvestri, N., Mazzoncini, M. & Menini, S., 2002. Using the CropSyst Model in continuous rainfed maize (*Zea mays* L.) under alternative management options. *Ital. J. Agron.* 6, 43-56.
- Bennie, A.T.P. & Hensley, M., 2001. Maximizing precipitation utilization in dryland agriculture in South Africa - a review. *J. Hydrol.* 241, 124-139.
- Black, A.L. & Bauer, A., 1990. Sustainable cropping systems for the Northern Great Plains. Bismarck, ND.
- Borg, H. & Grimes, D.W., 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans. ASAE* 29, 194-197.
- Bouman, B.A.M., 2007. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales. *Agric. Syst.* 93, 43-60.
- Bouzo, C.A., 2004. Régimen de radiación diurno en cultivos en hileras. En: Pilatti, M. & Norero, A. (Eds.), Simulación de cultivos anuales. Formulacións básicas del desenvolvimiento normal, Rosario, Argentina.

- Bricchi, E. & Cisneros, J.M. (Eds.), 1998. Soil porosity modifications induced by compaction. Montpellier, Francia.
- Cabido, D., Cabido, M., Garré, S.M., Gorgas, J.A., Miatello, R., Ravelo, A., Rambaldi, S. & Tassile, J.L., 2003. Regiones naturales de la provincia de Córdoba. AGENCIA CÓRDOBA D.A.C.yT. - Dirección de Ambiente, Córdoba, Argentina.
- Calderini, D.F., Dreccer, M.F. & Slafer, G.A., 1997. Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat. *Field Crop Res.* 52, 271-281.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Ahuja, L. & Pereira, L., 2005. Simulating the fate of water in field soil-crop environment. *J. Hydrol.* 315, 1-24.
- Campbell, G.A. & Díaz, R., 1988. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. En: Bidinger, F.R. & Johansen, C. (Eds.), *Drought research priorities for the dryland tropics*. ICRISAT, Patancheru, India, pp. 15-26.
- Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117, 311-314.
- Campbell, G.S., 1985. *Soil physics with basic: Transport models for soil-plant systems*. Elsevier Science Publishing Company, New York, USA.
- Campbell, G.S., 1996. *ClimGen: weather generator software, a program that generated weather data (precipitation, maximum and minimum temperatures)*. Pullman, USA.
- Campbell, G.S. & Norman, J.M., 1989. The description and measurement of plant canopy structure. En: Russell, G., Marshall, B. & Jarvis, P.G. (Eds.), *Plant Canopy: Their Growth, Form and Function*. Cambridge University Press.
- Campbell, G.S. & Norman, J.M., 1998. *An introduction to environmental biophysics*. Springer, New York, USA.
- Campbell, G.S. & Stockle, C.O., 1993. Prediction and simulation of water use in agricultural systems. *Proceeding of the International Crop Science Congress*, Iowa State University. Iowa, USA.
- Caviglia, O. & Sadras, V., 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water-and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crop Res.* 69, 259-266.
- Caviglia, O.P. & Sadras, V., 2004. Long-term simulation of productivity on crop sequences differing in intensification in the Argentina pampas. En: Fisher, T. (Ed.), *4th International Crop Science Congress*, Brisbane, Australia.
- Caviglia, O.P., Sadras, V. & Andrade, F., 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 Crop Res.* 87, 117 - 129.
- Caviglia, O.P., Sadras, V.O. & Andrade, F. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *Field Crop Res.* 149: 300-311.
- Cazorla, C., Baigorria, T., Lardone, A., Bojanich, M., Aimetta, M. & Vilches, B., 2009. Antecedentes de maíz : barbecho o cultivos de cobertura? INTA Marcos Juárez, pp. 1-7.

- Cisneros, J.J., 1994. Caracterización del hidrohalmorfismo en ambientes representativos del centro - sur de Córdoba. Tesis de MSc. Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Cisneros, J.J., Degioanni, A., Gil, H., Cantero, J.J., Cantero G, A., Becerra, V., Rang, S., Milanesio, A. & Chiapparoli, A., 2001. Distrito de ordenamiento ambiental en el sudeste de Córdoba. Convenio UNRC - DPSyOH Buenos Aires, Río Cuarto, Argentina.
- Cisneros, J.M., Cholaky, C., Bricchi, E., Giayetto, O. & Cantero, J.J., 1997. Evaluación del efecto del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un haplustol típico del centro de Córdoba. Rev. Universidad Nacional de Río Cuarto 17, 13-22.
- Cisneros, J.M., de Prada, J.D., Degioanni, A., Cantero Gutiérrez, A., Gil, H., Reynero, M.A., Shah, F. & Boris, B.U., 2005. Potencial de escurrimiento de cuencas agrícolas en relación a los cambios de uso entre 1986 y 1999.
- Clawson, k.L., Specht, J.E., Bland, B.L. & Garat, A.F., 1986. Water use efficiency in soybean pubescence density isolines - A calculation procedure for estimating daily values. Agron. J. 78, 483-486.
- Collino, D.J., Dardanelli, J.L., Sereno, R. & Racca, R.W., 2001. Physiological responses of argentine peanut varieties to water stress. - Light interception, radiation use efficiency. Field Crop Res. 70, 177-184.
- Comerma, J., Guenni, L. & Medina, G., 1986. Validación del balance hídrico del modelo Ceres-maíz en la zona de Maracay, Estado Aragua Venezuela. Agronomía Tropical 35, 115-132.
- Confalonieri, R. & Bechini, L., 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. Eur. J. Agron. 21, 223-237.
- Copeland, P.J., Allmaras, R.K., Crookston, R.K. & Nelson, W.W., 1993. Corn - soybean rotation effects on soil water depletion. Agron. J. 85, 203 - 210.
- Crookston, R.K., 1995. The rotation effect in corn. En: Wilkerson, D. (Ed.), Proc. Annu. Corn Sorghum Res. Conf., Chicago, USA.
- Crookston, R.K., Kurle, J.E., Copeland, P.J., Ford, J.H. & Lueschen, W.E., 1991. Rotational cropping sequence affects yields of corn and soybean. Agron. J. 83, 108 - 113.
- Cholaky, C.G., 2003. Efectividad y persistencia de la labor con subsolador alado, en función de la humedad y compactación previa. Tesis MSc. UNRC, Río Cuarto, Argentina.
- Dardanelli, J.L., Bachmeier, O.A., Sereno, R. & Gil, R.C., 1997. Potetial soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil. Field Crop Res. 54, 29-38.
- Dardanelli, J.L. & Collino, D., 2002. Estimation of the water table contribution to alfalfa crops in the Argentinean Pampa Region. Agriscientia 19, 11-18.
- Dardanelli, J.L., Collino, D., Otegui, E. & Sadras, V., 2004a. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción en los cultivos de grano. En: Satorre, E., Benech Arnold, R., Slafer, G., de la Fuente, E., Miralles, D., Otegui, M. & Savin, R. (Eds.), Producción De Granos. Bases Funcionales Para Su Manejo. Editorial FAUBA, Buenos Aires, Argentina, pp. 375-440.

- Dardanelli, J.L., Ritchie, J.T., Calmon, M., Andriani, J. & Collino, D., 2004b. An empirical model for root water uptake. *Field Crop Res.* 87, 59-71.
- Dardanelli, J.L., Suero, E.E., Andrade, F. & Andriani, J.M., 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11, 747-756.
- de Prada, J., Boretto, J., Ferrando, M., García, A.A., Olmos, J. & Sánchez, M., 1994. Proyecto de conservación y ordenamiento de tierras -General Deheza, Córdoba.
- De Prada, J.D. & Penna, J.A., 2009. Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el sur de Córdoba, Argentina. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- de Santa Olalla Mañas, F.M., Ortega Álvarez, J.F. & López Urrea, R., 2005. Eficiencia en el uso del agua. En: de Santa Olalla Mañas, F.M., López Fuster, P. & Calera Belmonte, A. (Eds.), *Agua y Agronomía*. Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 273-293.
- Degioanni, A., 1998. Organización Territorial de la Producción Agraria en la Región de Río Cuarto (Argentina). Tesis PhD. Universidad de Alcalá de Henares, España.
- Degioanni, A., Gil, H., Becerra, V., Bonadeo, E., Cisneros, J., de Prada, J., Diez, A., Bergesio, L. & Cantero G., A., 2012. Cultivos, uso y manejo de los suelos en el sur de Córdoba. Enseñanzas de la sequía 2011-12. 1-23.
- Della Maggiora, A.I., Gardiol, J.M. & Irigoyen, A.I., 2002. Requerimientos hídricos. En: Andrade, F. & Sadras, V. (Eds.), *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA INTA Balcarce - F.C.A. U.N.M.P., Balcarce, Argentina, pp. 157-173.
- Díaz Zorita, M., Duarte, G.A. & Fernández Canigia, M.V., 2000. La siembra directa y los sistemas mixtos de producción en el Oeste de Buenos Aires. INTA - EEA Gral. Villegas, Argentina.
- Earl, H.J. & Davis, R.F., 2003. Effect of Drought Stress on Leaf and Whole Canopy Radiation Use Efficiency and Yield of Maize. *Agron. J.* 95, 688-696.
- Eck, H.V. & Winter, S.R., 1992. Soil profile modification effects on corn and sugarbeet grown with limited water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1298-1304.
- Espósito, G.P., 2002. Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranzas en cultivo de maíz. Tesis MSc. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- Espósito, G.P., Balboa, G., Cerliani, C., Balboa, R. & Castillo, C., 2012. Rendimiento potencial de maíz en Río Cuarto (Córdoba, Argentina). 3era. Reunión Internacional de Riego. INTA Manfredi. 30 y 31 de Octubre 2012.
- Espósito, G.P., Valiente Gómez, M., Calera Belmonte, A., Castillo, C., Balboa, G. & Videla Mensegue, H., 2011. Siembra directa y eficiencia en el uso del agua de riego en maíz. XXIX CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS CÓRDOBA (España) - 7-9 de junio de 2011.
- FAO, 2002. Agua y cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Roma, Italia.
- FAO, 2013. Climate-Smart Agriculture. Rome, Italy.
- Farahani, H., Peterson, G., Westfall, D., Sherrod, L. & Ahuja, L., 1998. Soil water storage in dryland cropping systems: the significance of cropping intensification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 984-991.

- Fauconier, D., 1986. Soya. Fertilising for high yield. IPI. Bulletin 1, 3-60.
- Fehr, W.R. & Caviness, C.E., 1977. Stages of Soybean Development. Special Report 80. Iowa State University, Iowa, USA.
- Ferrer, F. & Stockle, C.O., 1999. A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.* 19, 15-23.
- Ferrer, F., Villar, J.M. & Stockle, C., 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. *Invest. Agr. Prot. Veg.* 15, 237-251.
- Friedman, S., 2004. Simulation of a potential error in determining soil salinity from measured apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 593-599.
- Fukai, S., 1993. Intercropping - bases of productivity. *Field Crop Res.* 34, 239 - 245.
- Gardner, W.R., 1958. Some steady state solutions to the unsaturated flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85, 228-232.
- Gee, G.W. & Bauder, J.W., 1986. Particle size analysis. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* Agronomy Monograph 9. ASA and SSSA, Wisconsin, USA, pp. 383-411.
- Gijzen, H. & Goudriaan, J., 1989. A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops. *Agric. For. Meteorol.* 48, 1-20.
- Gil, R.C., 2004. Uso y manejo del agua en sistemas sustentable. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. JICA - INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 37-43.
- Gregory, P.J., Simmonds, L.P. & Pilbeam, C.J., 2000. Soil Type, Climatic Regime, and the Response of Water Use Efficiency to Crop Management. *Agron. J.* 92, 814-820.
- Hatfield, J.L., Sauer, T.J. & Prueger, J.H., 2001. Managing Soils to Achieve Greater Water Use Efficiency : A Review. *Agron. J.* 280, 271-280.
- Hesketh, J.D. & Jones, J.B., 1980. Predicting photosynthesis for ecosistemas models. CRC Press.
- Higgs, R.L., Peterson, A.E. & Paulson, W.H., 1990. Crop rotations: sustainable and profitable. *J. Soil Water Conserv.* 45, 68-70.
- Howell, T.A., Tolk, J.A., Schneider, A.D. & Evett, S.R., 1998. Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing maturity. *Agron. J.* 90, 3-9.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. & Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agron. J.* 101, 448-459.
- Huang, M., Shao, M., Zhang, L. & Li, Y., 2003. Water use efficiency and sustainability of different long - term crop rotation systems in the Loess Plateau of China. *Soil Till. Res.* 72, 95 - 104.
- Irmak, A., Jones, J.W., Mavromatis, T., Welch, S.M., Boote, K.J. & Wilkerson, G.G., 2000. Evaluating Methods for Simulating Soybean Cultivar Responses Using Cross Validation. *Agron. J.* 92, 1140-1149.

- Jones, A.C., Bland, W.L., Ritchie, J.T. & Williams, J.R., 1991. Simulation of root growth. En: Hanks, J. & Ritchie, J.T. (Eds.), *Modeling Plant and Soil Systems*. Agronomy Monograph No. 31 ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA, pp. 91-123.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. & Ritchie, J.T., 2003. DSSAT Cropping System Model. *Eur. J. Agron.* 18, 235-265.
- Kang, S.Z., Shi, P., Pan, Y.H., Liang, Z.S., Hu, X.T. & Zhang, J., 2000. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrig. Sci.* 19, 181-190.
- Kemanian, A.R., Stockle, C.O. & Huggins, D.R., 2004. Variability of Barley Radiation-Use Efficiency. *Crop Sci.* 44, 1662-1672.
- Kemanian, A.R., Stockle, C.O. & Huggins, D.R., 2005. Transpiration-use efficiency of barley. *Agric. For. Meteorol.* 130, 1-11.
- Kiniry, J.R., Landivar, J.A., Witt, M., Gerik, T.J., Cavero, J. & Wade, L.J., 1998. Radiation-use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. *Field Crop Res.* 56, 265-270.
- Kiniry, J.R., Major, D.J., Izaurrealde, C., Gassman, P., Morrison, M., Williams, J.R., Bergentine, R. & Zentner, R.P., 1995. EPIC model parameters for crops and forages in the northern Great Plains of the U.S. and the prairie provinces of Canada. *Can. J. Crop Sci.* 75, 679-688.
- Klute, A. & Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kobayashi, K. & Us Salam, M., 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92, 345-352.
- Langdale, G.W. & Wilson, R.L., 1987. Intensive cropping sequences to sustain conservation tillage for erosion control. *J. Soil Water Conserv.* 42, 352-355.
- Lindquist, J.L., Arkebauer, T.J., Walters, D.T., Cassman, K.G. & Dobermann, A., 2005. Maize Radiation Use Efficiency under Optimal Growth Conditions. *Agron. J.* 97, 72-78.
- Liu, J., Williams, J.R., Zehnder, J.B. & Yang, H., 2007. GEPIC - modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agric. Syst.* 94, 478-493.
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J. & Pereira, L.S., 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China plain. *Agric. Water Manage.* 36, 233-246.
- Lopez-Bellido, L., Lopez-Bellido, R.J., Castillo, J.E. & Lopez-Bellido, F.J., 2000. Effects of Tillage, Crop Rotation, and Nitrogen Fertilization on Wheat under Rainfed Mediterranean Conditions. *Agron. J.* 92, 1054-1063.
- Luters, A. & Salazar Lea Plaza, J.C., 2000. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Traducción de: USDA. 1999. *Soil quality test kit guide*, Buenos Aires, Argentina.
- Maddoni, G.A., Chelle, M., Drouet, J.L. & Andrieu, B., 2001a. Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measurements. *Field Crop Res.* 70, 1-13.

- Maddonni, G.A. & de la Fuente, E.B., 2004. ¿Qué se entiende por estructura del cultivo? En: Satorre, E., Benez Arnold, R., Slafer, G., de la Fuente, E.B., Miralles, D., Otegui, E. & Savin, R. (Eds.), Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía - UBA., Buenos Aires, Argentina, pp. 247 - 252.
- Maddonni, G.A., Otegui, E. & Cirilo, A.G., 2001b. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crop Res.* 71, 183-193.
- MAGYA, 2013. Estadísticas de la Producción Agrícola de la Provincia de Córdoba. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentos de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Mandal, U.K., Sarma, K.S.S., Victor, U.S. & Rao, N.H., 2002. Profile water balance model under irrigated and rainfed systems. *Agron. J.* 94, 1204-1211.
- Marcos, J., 1997. Corn production under dryland conditions in eastern Washington. Department of Crop and Soil Sciences. Thesis MSc. Washington State University, Pullman, USA.
- Marcos, J., 2000. Simulation-based assessment of alternative crops in the dryland Pacific Northwest. Thesis PhD. Washington State University, p. 171.
- Marcos, J. & Campbell, G.S., 2002. SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos. Río Cuarto, Argentina.
- Martini, G. 2007. Variedades y Modelos Generales de Producción en el Movimiento CREA. En: Satorre, E.; Buscarol, M.; & Calviño, P. Producción de Trigo. AACREA. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Martini, G. & Angeli, A. 2014. Modelos Zonales de Producción de Maíz en el Movimiento CREA. En: Satorre, E. Maíz: Técnicas probadas para una producción rentable. AACREA. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Masri, Z. & Ryan, J., 2006. Soil organic matter and related physical properties in a Mediterranean wheat-based rotation trial. *Soil Till. Res.* 87, 146 - 154.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D. & Hoogenboom, G., 2001. Developing Genetic Coefficients for Crop Simulation Models with Data from Crop Performance Trials. *Crop Sci.* 41, 40-51.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Wilkerson, G.G. & Hoogenboom, G., 2002. Repeatability of Model Genetic Coefficients Derived from Soybean Performance Trials across Different States. *Crop Sci.* 42, 76-89.
- Mercau, J.L., Dardanelli, J.L., Collino, D., Andriani, J., Irigoyen, A.I. & Satorre, E., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crop Res.* 100, 200-209.
- Michelena, R., 2004. Estructura del suelo y dinámica de nutrientes en el sistema de siembra directa. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. JICA - INTA, Buenos Aires, Argentina., pp. 44-50.
- Miller, P.R., Gan, Y., McConkey, B.G. & McDonald, C.L., 2003. Pulse crops for the Northern Great Plains: I. Grain Productivity and Residual Effects on Soil Water and Nitrogen. *Agron. J.* 95, 972-979.
- Mills, H.A. & Jones, J.B., 1996. Plant análisis Handbook II. MicroMacro Publishing, Georgia, USA.

- Moeller, C., Pala, M., Manschadi, A.M., Meinke, H. & Sauerborn, J., 2007. Assessing the sustainability of wheat-based cropping systems using APSIM: model parameterisation and evaluation. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 75-86.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R. & Makin, I., 2003. A water-productivity framework for understanding and action. En: Kijne, J., Barker, R. y Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. CAB International, Wallingford, UK.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. London B* 281.
- Monteith, J.L., 1978. Reassessment of maximum growth rates for C₃ and C₄ crops. *Exp. Agric.* 14, 1-5.
- Monzón, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A. & Caviglia, O.P., 2007. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crop Res.* 101, 44-52.
- Muchow, R.C., Robertson, M.J. & Pengelly, B.C., 1993. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. *Field Crop Res.* 32.
- Muchow, R.C. & Sinclair, T.R., 1994. Nitrogen Response of Leaf Photosynthesis and Canopy Radiation Use Efficiency in Field-Grown Maize and Sorghum. *Crop Sci.* 34, 721-727.
- Muchow, R.C., Sinclair, T.R. & Bennett, J.M., 1990. Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations. *Agron. J.* 82, 338-343.
- Navarro Dujmovich, M., Bongiorno, C. & Confalone, A., 1996. Evapotranspiration efficiency of corn grown under rainfed conditions. En: Cramp, C.R., Sadler, E.J. & Yoder, R.E. (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, San Antonio Convention Center, San Antonio, Texas, November 3-6. , pp. 1056-1057.
- Nielsen, D.C., Zhang, H. & Pala, M., 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the great plains. *Agron. J.* 97, 364-372.
- Otegui, E., Nicolini, M.G., Ruiz, R.A. & Dodds, P.A., 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87, 29-33.
- Oweis, T., Zhang, H. & Pala, M., 2000. Water Use Efficiency of Rainfed and Irrigated Bread Wheat in a Mediterranean Environment. *Agron. J.* 92, 231-238.
- Oyarzun, R.A., Stockle, C.O. & Whiting, M.D., 2007. A simple approach to modeling radiation interception by fruit-tree orchards. *Agric. For. Meteorol.* 142, 12-24.
- Pala, M., Stockle, C. & Harris, 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.
- Pankuk, C.D., Stockle, C.O. & Papendick, R.I., 1998. Evaluating CropSyst simulations of wheat management in a wheat - fallow region of the US Pacific Northwest. *Agric. Syst.* 57.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. & Ojima, D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 51, 1173-1179.
- Pasarella, V. & Savin, R., 2003. Características físicoquímicas de los granos., *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. FAUBA. UBA.

- Penning de Vries, F.W.T., Brunsting, A.H.M. & Van Laar, H.H., 1974. Products, requirements and efficiency of biosynthesis: a quantitative approach. *J. Theor. Biol.* 45, 339-377.
- Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., ten Berge, H.F.M. & Bakema, A., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. IRR I Los Baños - Pudoc Wageningen.
- Penning de Vries, F.W.T., Rabbinge, R. & Groot, J.J.R., 1997. Potential and attainable food production and food security in different regions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 352, 917-928.
- Pergolini, S.O., 2003. Comportamiento de cultivares de trigo ante cambios en la disponibilidad hídrica y nutricional. Tesina de Grano. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- Peterson, G.A., Schlegel, A.J., Tanaka, D.L. & Jones, O.R., 1996. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems. *J. Prod. Agric.* 9, 180-186.
- Pierce, F.J. & Rice, C.W., 1988. Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. En: *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. ASA Spec. Publ. 51. ASA, CSSA, and SSSA., Madison, WI.
- Pikul, J.L. & Aase, J.K., 1995. Infiltration and soil properties as affected by annual cropping in the northern Great Plain. *Agron. J.* 87, 656 - 662.
- Pilatti, M.A. & Norero, A.L., 2004. Simulación de cultivos anuales. Formulación básica del desenvolvimiento normal. Universidad Nacional del Litoral.
- Pilatti, M.A., Vegetti, A. & Ghiberto, P., 1999. Fitometría. *Rev. FAVE* 13, 23-37.
- Pizarro, F., 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos., Madrid, España.
- Porter, P.M., Lauer, J.G., Lueschen, W.E., Ford, J.H., Hoverstad, T.R., Oplinger, E.S. & Crookston, R.K., 1997. Environment Affects the Corn and Soybean Rotation Effect. *Agron. J.* 89, 442-448.
- Passioura, J.B., 1996. Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation* 20, 79-83.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P., 1992. Numerical recipes. The art of scientific computing. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Proot, A., Barraco, M., Scianca, C. & Álvarez, C., 2010. Efecto de la fertilización nitrogenada y de la densidad de siembra sobre los rendimientos y la eficiencia de uso de agua en maíces tardíos en la pampa arenosa. Memoria Técnica INTA Gral. Villegas, pp. 15-19.
- Quiroga, A., Fernandez, D., Ormeño, O. & Ventura, J., 1999. Efecto del manejo (rotación - agricultura) sobre los contenidos de Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo en suelos de la región semiárida pampeana. INTA - EEA Anguil, Argentina.
- Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellensa, J. & Sahli, A., 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manage.* 81, 335-357.
- Rao, S.C. & Northup, B.K., 2008. Forage and Grain Soybean Effects on Soil Water Content and Use Efficiency. *Crop Sci.* 48, 789-793.
- Ritchie, J.T. & Hanway, J.J., 1997. How a corn plant develops. Special Report 48, Iowa, USA.

- Rivetti, A.R., 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto , Córdoba , Argentina . I . Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. Rev. FCA UNCuyo 38, 25-36.
- Robinson, D.A., Lebron, I., Lesch, S.M. & Shouse, P., 2004. Minimizing Drift in Electrical Conductivity Measurements in High Temperature Environments using the EM-38. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, 339-345.
- Rohrig, M. & Stutzel, H., 2001. A model for light competition between vegetable crops and weeds. Eur. J. Agron. 14, 13-29.
- Rohrig, M., Stutzel, H. & Alt, C., 1999. A three-dimensional approach to modeling light interception in heterogeneous canopies. Agron. J. 91, 1024-1032.
- Roygard, J.K.F., Alley, M.M. & Khosla, R., 2002. No-till corn yields and water balance in the Mid-Atlantic Coastal Plain. Agron. J. 94, 612-623.
- Sadras, V., Baldock, J., Roget, D. & Rodriguez, D., 2003. Measuring and modelling yield and water budget components of wheat crops in coarse-textured soils with chemical constraints. Field Crop Res. 84, 241-260.
- Sadras, V., Ferreiro, M., Gutheim, F. & Kantolic, A., 2002. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En: Andrade, F. & Sadras, V. (Eds.), Bases para el manejo de maíz, el girasol y la soja. EEA INTA Balcarce - Fac. de Ciencias Agrarias UNMP, Balcarce, Argentina.
- Sadras, V.O. & Roget, D.K., 2004. Production and Environmental Aspects of Cropping Intensification in a Semiarid Environment of Southeastern Australia. Agron. J. 96, 236-246.
- Salado Navarro, L.R., Sinclair, T.R., Rodriguez, R. & Abascal, G.F., 2006. Simulación de soja en Argentina. II. Rendimientos vs lluvias. 3º Congreso de Soja del Mercosur, Rosario, Argentina, pp. 29-32.
- Sibma, L., 1987. Ontwikkeling en groei van mais (*Zea mays L.*) onder Nederlandse omstandigheden., Pudoc, Wageningen.
- Siddique, K.H.M., Tennant, D., Perry, M.W. & Belford, R.K., 1990. Water use and water use efficiency of old and modern cultivars in a Mediterranean-type environment. Aus. J. Agric. Res. 41, 431-447.
- Sierra, E., Pérez, S. & Nizzero, G., 2005. Efecto del comportamiento temporal del régimen de precipitaciones en el sur de Córdoba (Argentina) sobre la sustentabilidad de los agroecosistemas., Acta VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural, Merlo (SL), Argentina.
- Sinclair, T.R. & Bai, Q., 1997. Analysis of High Wheat Yields in Northwest China. Agric. Syst. 53, 373-385.
- Sinclair, T.R. & Bennett, J.M., 1998. Water. En: Sinclair, T.R. & Gardner, F.P. (Eds.), Principles of ecology in plant production. CAB International, Florida, USA, pp. 103-120.
- Sinclair, T.R. & Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review. Crop Sci. 29, 90-98.
- Sinclair, T.R. & Muchow, R.C., 2001. System Analysis of Plant Traits to Increase Grain Yield on Limited Water Supplies. Agron. J. 93, 263-270.

- Sinclair, T.R., Salado Navarro, L.R., Salas, G. & Purcell, L.C., 2007. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agric. Syst.* 94, 471-477.
- Singh, R., van Dam, J.C. & Feddes, R.A., 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agric. Water Manage.* 82, 253-278.
- Solbrig, O., 2002. La agriculturización de la Argentina: una cuestión de producción, equidad y medio ambiente. Exposición brindada en el marco del XII Congreso de AAPRESID.
- Staggenborg, S.A. & Vanderlip, R.L., 2005. Crop Simulation models can be used as dryland cropping systems research tools. *Agron. J.* 97, 378-384.
- Steduto, P., 2003. Biomass water-productivity. Comparing the growth-engines of crop models., FAO Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply, Rome.
- Steduto, P. & Albrizio, R., 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. *Agric. For. Meteorol.* 130, 269-281.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. & Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agron. J.* 101, 426-437.
- Steiner, J.L., 1994. Crop Residue Effect on Water Conservation. In: Unger, P.W. (Ed.), *Managing Agricultural Residues*. Lewis Publishers, Brushland, TX.
- Stockle, C. & Jara, J., 1998. Modeling transpiration and soil water content from a corn (*Zea Maize L.*) field: 20 min vs. daytime integration stem. *Agric. For. Meteorol.* 92, 119-130.
- Stockle, C. & Nelson, R., 1999. Cropping Systems simulation model - User's online manual., Pullman
- Stockle, C.O., Cabelguenne, M. & Debaeke, P., 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. *Eur. J. Agron.* 7, 89-98.
- Stockle, C.O., Donatelli, M. & Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289-307.
- Stockle, C.O. & Kemanian, A.R., 2004. Driving crop growth model: radiation -versus transpiration - use efficiency. En: Fischer, T. (Ed.), *New directions for a diverse planet: Proceedings for the 4th International Crop Science Congress*, Brisbane, Australia.
- Stockle, C.O. & Kiniry, J.R., 1990. Variability in crop radiation use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *Field Crop Res.* 25, 171-181.
- Stockle, C.O., Martin, S. & Campbell, G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46, 335-359.
- Stockle, C.O. & Nelson, R., 1996. *Cropsys: Cropping systems simulation model user's manual*. Washington State University, Pullman, USA.
- Suriano, J.M. & Ferpozzi, L., 1993. Los cambios climáticos en la Pampa también son historia. *Todo es Historia* 306, 8-25.
- Tanaka, D.L., Anderson, R.L. & Rao, S.C., 2005. Crop Sequencing to Improve Use of Precipitation and Synergize Crop Growth. *Agron. J.* 97, 385-390.

- Tanner, C.B. & Sinclair, T.R., 1983. Efficient water use in crop production: research or re-research? En: Waylor, H.M., Jordan, W.R. & Sinclair, T.R. (Eds.), Limitations to efficient water in crop production. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Titonell, P., 2004. El carbono orgánico de los suelos del centro de Argentina. Derivando indicadores de sustentabilidad a partir de su evolución y estado de equilibrio actual. Tesis MSc. UNRC, Río Cuarto, Argentina.
- Titonell, P., Zingore, S., van Wijk, M.T., Corbeels, M. & Giller, K.E., 2007. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crop Res.* 100, 348-368.
- Tsubo, M. & Walker, S., 2002. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agric. For. Meteorol.* 110, 203-215.
- UN-Water, 2010. Climate change adaptation: the pivotal role of water. UN-Water policy brief. (available at http://www.unwater.org/downloads/unw_ccpol_web.pdf).
- Utset, A., Farré, I., Martínez-Cob, A. & Caverro, J., 2004. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. *Agric. Water Manage.* 66, 205-219.
- Varvel, G.E., 1995. Precipitation Use Efficiency of Soybean and Grain Sorghum in Monoculture and Rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 527-531.
- Videla Mensegue, H., 2006. Producción de soja en suelos con capa freática somera en el depto. Roque Sáenz Peña (Córdoba). Tesina de Grado. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Videla Mensegue, H., Degioanni, A. & Cisneros, J., 2007a. Estimación de la contribución de agua de una capa freática somera a los requerimientos hídricos del cultivo de soja. XXI Congreso Nacional del Agua, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Videla Mensegue, H., Marcos, J., Espósito, G.P. & Degioanni, A., 2007b. Comparación de dos métodos de acumulación potencial de biomasa en ambientes subhúmedos del centro de Argentina. *Actas Workshop Internacional: Eco Fisiología Vegetal Aplicada al Estudio de la Determinación del Rendimiento y la Calidad de los Cultivos de Grano Mar del Plata, Argentina.*
- Viglizzo, E.F. & Frank, F.C., 2005. Situación ambiental en las ecorregiones Pampa y Campos y Malezales. En: Brown, A., Martínez Ortiz, U., Acerbi, M. & Corcuera, J. (Eds.), *La situación ambiental argentina 2005*. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires, pp. 263-269.
- Villar, J. & Cencig, G., 2010. Secuencias agrícolas : recurso para mejorar el uso del agua y la productividad del suelo. *Información Técnica Cultivos de Verano. Campaña 2010. Publicación Misceláneas No. 118.* INTA, Rafaela, Argentina, pp. 24-35.
- Wallace, J.S., 2000. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agr. Ecosyst. Environ.* 82, 105 - 119.
- Wallace, J.S. & Batchelor, C.H., 1997. Managing water resources for crop production. *Phil. Trans. R. Soc. London* 352, 937-947.
- Wallach, D., 2006. Evaluating crop model. En: Wallach, D., Makowski, D. & Jones, J.W. (Eds.), *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications.* ELSEVIER, Amsterdam, The Netherlands.

-
- Wallach, D. & Genard, M., 1998. Effect of uncertainty in input and parameter values on model prediction error. *Ecol. Model.* 105, 337-345.
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J.-E., Debaeke, P., Leenhardt, D. & Aubertot, J.-N., 2001. Parameter Estimation for Crop Models: A New Approach and Application to a Corn Model. *Agron. J.* 93, 757-766.
- Wang, S., Chen, W. & Cihlar, J., 2002. New calculation methods of diurnal distribution of solar radiation and its interception by canopy over complex terrain. *Ecol. Model.* 155, 191-204.
- Welch, S.M., Roe, J.L. & Dong, Z., 2003. A Genetic Neural Network Model of Flowering Time Control in *Arabidopsis thaliana*. *Agron. J.* 95, 71-81.
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation model performance. *B. Am. Meteorol. Soc.* 63, 1309-1313.
- Yu, Q., Saseendran, S.A., Ma, L., Flerchinger, G.N., Green, T.R. & Ahuja, L., 2006. Modelling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM. *Agric. Syst.* 89, 457-477.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T. & Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth state of cereals. *Weed Res.* 14, 415-421.
- Zwart, S.J. & Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agric. Water Manage.* 69, 115-133.

Apéndice 1

MODELO DE SIMULACIÓN SWB

Apéndice 2

RESUMEN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE EUA

Apéndice 3

RESUMEN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS

Apéndice 4

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO CLIMGEN

Apéndice 5

DATOS CLIMÁTICOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN DE SWB

Apéndice 6

PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO SWB

Apéndice 7

RESULTADOS DE LA CORROBORACIÓN DEL MODELO SWB

Apéndice 1: MODELO DE SIMULACIÓN SWB⁷

1. Introducción

El modelo SWB simula el transporte de agua en el sistema suelo – planta - atmósfera y está acoplado con un simulador de crecimiento y desarrollo de cultivos. El balance de agua en el suelo es estimado mediante una solución numérica por diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales que describen el flujo y almacenamiento de agua en el suelo. Opera en forma diaria y requiere datos y parámetros de entrada de clima, suelo y cultivos e información inicial del estado hídrico del suelo.

2. Ambiente atmosférico

La evapotranspiración potencial (*ETP*), es calculada con la ecuación de *Penman-Monteith* (Monteith & Unsworth, 1990) usando datos diarios de viento.

La ecuación de *Penman-Monteith* para *ETP* en kg m⁻² día usada en el modelo está dada por:

$$ETP = \frac{s}{s + \gamma^*} \frac{R_n - G}{\lambda} + \frac{\gamma^*}{s + \gamma^*} \frac{639VPD}{r_v} \quad (\text{Ecuación 15})$$

dónde *s* es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor, (Pa °C⁻¹), *R_n* es la radiación neta (MJ m⁻² día⁻¹), *G* es la densidad de flujo de calor hacia el suelo (MJ m⁻² día⁻¹), *λ* es el calor latente de vaporización del agua (2.45 MJ kg⁻¹), *VPD* es el déficit de vapor del aire (kPa), *r_v* es la resistencia al transporte de vapor (s m⁻¹), *γ** es la constante psicrométrica aparente y 639 es un factor de conversión de unidades.

La constante psicrométrica aparente, *γ**, es calculada como:

$$\gamma^* = \gamma \frac{r_v}{r_a} \quad (\text{Ecuación 16})$$

dónde *γ* es la constante psicrométrica termodinámica (67 Pa °C⁻¹ a nivel del mar) y *r_a* es la resistencia de la capa límite.

La resistencia de la capa límite, *r_a*, está determinada por:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

dónde *u₂* es la velocidad del viento (m s⁻¹) medida a una altura de 2 m.

La resistencia al transporte de vapor, *r_v*, está dada por:

⁷ Adaptado de Marcos & Campbell (2002).

$$r_v = r_a + r_c \quad (\text{Ecuación 18})$$

dónde r_c es la resistencia de la canopia para un cultivo gramíneo de referencia de 12 cm de alto (Smith *et al.* 1991). La resistencia de la canopia, r_c es establecida en 70 m s^{-1} , de esta forma todas las resistencias son calculadas en base a velocidad del viento.

Radiación neta, R_n , es computada como:

$$R_n = 0.8St + Lni \quad (\text{Ecuación 19})$$

dónde 0.8 es al absorptividad de una superficie a la radiación de onda corta, St es la radiación global diaria incidente en la superficie de la tierra ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y Lni es la radiación neta de onda larga ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

La radiación neta de onda larga, Lni , está dada por (Monteith & Unsworth, 1990; Campbell, 1996):

$$Lni = (0.026Ta - 9.2) \left[0.96 - \frac{1}{1 + 0.048 \exp(7.1Tr)} \right] \quad (\text{Ecuación 20})$$

El primer término de la Ecuación 20 es la radiación neta isotérmica de onda larga emitida por cielo claro sugerida por Monteith & Unsworth (1990) y el último término es el efecto de la nubosidad. La temperatura media diaria del aire es Ta . La radiación neta isothermal, Lni , es calculada solamente durante las horas de luz por lo tanto debe ser corregida por la fracción del día.

La densidad de flujo de calor hacia el suelo (G) es calculado como el 10% de R_n (Clothier *et al.*, 1986). Déficit de presión de vapor diario o déficit medio de presión VPD es estimado como $0,66Dx$. Dónde Dx es el déficit de presión de vapor máximo o el déficit de presión de vapor a la hora en que se da la máxima temperatura y es estimado como:

$$Dx = s(Tx - Tn) \quad (\text{Ecuación 21})$$

dónde Tx y Tn son las temperaturas máximas y mínimas respectivamente, y s es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) en el punto de la temperatura promedio de las temperaturas máximas y mínimas.

La pendiente de la curva de saturación de presión de vapor, s , es aproximada como:

$$s = 0.001 \{ [(0.00223Tave + 0.0549)Tave + 2.97] Tave + 45.3 \} \quad (\text{Ecuación 22})$$

La predicción del VPD a partir de la diferencia de las presiones de vapor a saturación a las temperaturas máxima y mínima está basada en el supuesto que el aire se enfríe hasta punto de rocío durante la noche y que la presión de vapor se mantiene relativamente constante durante el curso del día. Cuando se opera el modelo, datos observados diarios de clima son leídos de un archivo Excel. El mínimo set de datos diarios necesarios para la operación del modelo está compuesto por precipitación diaria en mm, temperatura máxima y mínima diaria en $^\circ\text{C}$ y velocidad media diaria del viento en m s^{-1} .

3. Balance de agua en el suelo

El modelo *SWBModel* simula infiltración, redistribución, evaporación y absorción de agua por la planta. El escurrimiento disminuye la cantidad de agua que ingresa al perfil de suelo y percolación profunda ocurre como resultado de gradientes gravitatorios. El transporte y almacenamiento de agua dentro del suelo están representados por una red de conductores y capacitores. La solución del problema de red es alcanzada mediante métodos numéricos para determinar como cambian el contenido hídrico y potencial agua en el tiempo y en cada nodo de la red.

El flujo de agua (J_w) ocurre tanto en forma líquida (J_l) como en forma de vapor (J_v). La densidad de flujo en forma líquida dentro de un elemento en el perfil de suelo está dada por la ley de Darcy y es función de la conductividad hidráulica y gradientes de potencial agua a través de un elemento:

$$J_l = -k \frac{\partial \psi}{\partial z} + gk \quad (\text{Ecuación 23})$$

dónde J_l es la densidad de flujo de agua ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), k es la conductividad hidráulica (kg s m^{-3}), ψ es el potencial agua mátrico del suelo (J kg^{-1}), z es la profundidad (m) y g es la constante gravitatoria (9.8 m s^{-2}).

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

$$\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + g \frac{\partial k}{\partial z} - S \quad (\text{Ecuación 24})$$

dónde ρ_w es la densidad del agua (1000 kg m^{-3}), θ es el contenido hídrico volumétrico ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) y 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.

La conductividad hidráulica, k , está dada en término de potencial ψ (Campbell, 1985):

$$k = k_s \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^n \quad \text{si } \psi_m < \psi_e \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$k = k_s \quad \text{si } \psi_m \geq \psi_e \quad (\text{Ecuación 26})$$

dónde k_s es la conductividad hidráulica saturada (kg s m^{-3}), ψ_e es el potencial de entrada de aire (J kg^{-1}), y n dado por (Campbell, 1974):

$$n = 2 + \frac{3}{b} \quad (\text{Ecuación 27})$$

La constante b es un parámetro de suelo que depende de la estructura y textura del suelo. Este parámetro describe la pendiente de la curva característica de humedad.

El potencial agua y el contenido hídrico volumétrico se relacionan de la siguiente manera de acuerdo a Campbell (1974):

$$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (\text{Ecuación 28})$$

El potencial de entrada de aire se define según:

$$\psi_e = \psi_{fc} \left(\frac{\theta_{fc}}{\theta_s} \right)^b \quad (\text{Ecuación 29})$$

dónde θ_s es el contenido hídrico volumétrico a saturación, estimado a partir de información de densidad aparente (Mg m^{-3}).

Las fracciones de arcilla y limo y la densidad aparente son entradas al modelo. Con esa información, el modelo estima el parámetro b , el potencial de entrada de aire y la conductividad hidráulica saturada de acuerdo a relaciones sugeridas por Campbell (1998).

El factor de complicación es que, para flujo no saturado, la conductividad hidráulica es función de la variable dependiente (contenido hídrico o potencial agua del suelo). La ecuación de flujo es extremadamente no lineal, lo que hace que la solución numérica de la Ecuación 24 de flujo sea muy compleja. Gardner (1958) sugirió usar un método de transformación integral que usa el concepto de potencial de flujo mátrico (Φ , $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) como la fuerza directriz para el flujo de agua. Este potencial de flujo mátrico toma la forma de:

$$\Phi = \frac{k\psi}{(1-n)} \quad \text{si } \psi < \psi_e \quad (\text{Ecuación 30})$$

$$\Phi = k_s \left(\frac{\psi_e n}{(1-n)} + \psi \right) \quad \text{si } \psi \geq \psi_e \quad (\text{Ecuación 31})$$

La transformación resulta en una ecuación lineal para flujo estable:

$$J_l = \frac{-\partial\Phi}{\partial z} + k(\Phi)g \quad (\text{Ecuación 32})$$

Por lo tanto, reescribiendo la Ecuación 24 en su forma diferencial, el cambio en el contenido hídrico en cada nodo toma la forma de (Ferrer, 1996):

$$\rho_w \left(\frac{\partial\theta}{\partial t} \right) \Delta z_i = \frac{\Phi_{i+1} - \Phi_i}{\Delta z_i} - \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{\Delta z_{i-1}} + g(k_i^* - k_{i-1}^*) - S \quad (\text{Ecuación 33})$$

dónde $\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$ con z_i siendo la distancia desde la superficie del suelo hasta el nodo i .

La conductividad del elemento, k^* , está definida por:

$$k^* = \frac{(k_{i+1}\psi_{i+1} - k_i\psi_i)}{(\psi_{i+1} - \psi_i)(n-1)} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Para un suelo que tiene diferentes propiedades hidráulicas entre las capas que componen el perfil del suelo, Φ , θ y k no son funciones continuas de ψ a través de los límites de las capas. Por lo tanto, dos grupos de θ y k son definidos y asociados con cada nodo. Uno depende de las propiedades hidráulicas del elemento superior y el otro depende de las propiedades hidráulicas del elemento inferior. Una ecuación diferencial nueva para el cambio en contenido hídrico es definida en cada nodo i con la contribución de estos dos grupos de variables (Ferrer, 1996).

La densidad de flujo de vapor de agua (J_v) dentro del suelo bajo condiciones de flujo isotérmico se desprende de la ley de Fick para la difusión de gas y de la relación existente entre la humedad relativa y el potencial agua. La ecuación resultante para la densidad de flujo de vapor toma la forma de:

$$J_v = -k_v \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (\text{Ecuación 35})$$

dónde k_v es la conductividad de vapor de agua que toma la forma de:

$$k_v = 0.66 D_v V_d \phi_g \frac{\partial r}{\partial \psi} \quad (\text{Ecuación 36})$$

dónde D_v es el coeficiente de difusión del vapor, con un valor de $2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, V_d es la densidad de vapor con un valor de 0.017 g m^{-3} a 20° C y ϕ_g es la porosidad con aire calculada a partir del contenido hídrico volumétrico.

Evaporación en la superficie del suelo es estimada en base a la fracción de la evapotranspiración potencial (ETP) que corresponde a la evaporación potencial (E_p). ETP es calculada con la Ecuación 15 y la partición es hecha considerando cual fracción de la energía solar disponible es interceptada por la canopia del cultivo y cuál es la fracción absorbida por la superficie del suelo. De acuerdo a esto, E_p está dada por:

$$E_p = (1 - f)ETP \quad (\text{Ecuación 37})$$

dónde f es la fracción de la radiación incidente que es interceptada por la canopia del cultivo. La interceptación es tomada del módulo de simulación de crecimiento del cultivo y está basada en el índice de área foliar (LAI).

La densidad de flujo de vapor (J_{v0} , $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en la superficie del suelo es estimada como:

$$J_{v0} = k_{v0}(\psi_1 - \psi_0) \quad (\text{Ecuación 38})$$

dónde ψ_0 es el potencial agua en el nodo inmediatamente por arriba de la superficie del suelo, ψ_1 es el potencial agua del suelo en el primer nodo, y k_{v0} está dado por:

$$k_{v0} = \frac{E_p}{\psi_0} \quad (\text{Ecuación 39})$$

A partir de las ecuaciones de flujo, el cómputo del balance de agua en el suelo es representado por una red de nodos. Ecuaciones de balance son definidas en cada nodo. Para el nodo i la expresión de balance toma la forma de:

$$F_{(i)} = J_{l(i-1)} - J_{l(i)} + J_{v(i-1)} - J_{v(i)} + W_{storage(i)} + S_{(i)} \quad (\text{Ecuación 40})$$

dónde $W_{storage}$ es el término de almacenamiento y S es el término fuente-destino.

El término de fuente-destino comprende procesos tales como la absorción de agua por parte del sistema de raíces (transpiración). Escribiendo expresiones similares para cada uno de los N nodos en la red, resulta en N ecuaciones con $N+2$ incógnitas. Condiciones de límite son suministradas al sistema tanto en la parte superior como en la parte inferior de la red. En la parte superior las condiciones de límite son la densidad de flujo de evaporación y la precipitación, a la cual se le descuenta el escurrimiento por el método de la curva número. En la parte inferior de la red la condición de límite es un potencial de agua a saturación que simula el efecto de la capa freática. El potencial de agua de la última capa de suelo, en contacto con la capa freática, es fijado en un potencial entre capacidad de campo y entrada de aire (saturación). Es decir se fija un potencial de agua a un contenido de agua (W_c) de:

$$W_c = (\theta_s - \theta_{cc}) \times 0.2 + \theta_{cc} \quad (\text{Ecuación 41})$$

dónde θ_s es saturación, θ_c es capacidad de campo.

El grupo de ecuaciones no lineales para el balance de masa es resuelto mediante el método Newton-Raphson y el algoritmo de Thomas para calcular los cambios en ψ que aproximen F a cero en cada intervalo de tiempo. En cada intervalo de tiempo el contenido hídrico de suelo es actualizado en todo el perfil.

La transpiración es agregada al balance de agua en la Ecuación 43 como un término de destino de absorción de raíces (U_i). Para cada capa la absorción es estimada como (Campbell & Stockle, 1993):

$$U_i = F_i G_p (\psi_{si} - \psi_L^*) \quad (\text{Ecuación 42})$$

dónde F_i es la fracción de densidad de raíces, G_p es la conductancia de la planta ($\text{kg}^2 \text{m}^{-2} \text{J}^{-1} \text{día}^{-1}$), ψ_{si} es el potencial de agua del suelo de la capa i , y ψ_L^* es el potencial agua de la hoja (J kg^{-1}).

La tasa de transpiración máxima posible justo antes del cierre estomático cuando el suelo está completamente húmedo (E_{max}) puede ser formulada como:

$$E_{max} = G_{pmax} (-\psi_{Lsc}) \quad (\text{Ecuación 43})$$

dónde G_{pmax} es la conductancia de la planta de un cultivo completamente desarrollado y saludable que cubre completamente el suelo y ψ_{Lsc} es el mínimo potencial agua de la hoja al cierre estomático. La

tasa máxima posible de transpiración E_{max} , y ψ_{lsc} son dados al modelo como parámetros de cultivo y caracterizan un cultivo o variedad.

La transpiración máxima posible (E_{max}) disminuye casi linealmente desde un estado en que el suelo se encuentra húmedo y con un potencial de agua en el suelo igual a 0 hasta un punto mínimo donde el potencial agua del suelo es equivalente al punto de marchitez permanente. Esta relación puede ser expresada como:

$$U_{max} = E_{max} f \left(1 - \frac{\psi_{save}}{\psi_{wilt}} \right) \quad (\text{Ecuación 44})$$

dónde U_{max} es la absorción máxima posible de agua, ψ_{save} es un potencial de agua del suelo medio ponderado, ψ_{wilt} es el potencial de marchitez de la planta, el cual, y tal como ψ_{lsc} , es dado al modelo como un parámetro de cultivo y f es la fracción de la radiación incidente que es interceptada por la canopia. El último término es para disminuir proporcionalmente la magnitud de E_{max} de un cultivo que cubre parcialmente el suelo.

El potencial agua de suelo medio ponderado, ψ_{save} , es calculado como:

$$\psi_{save} = \sum F_i \psi_{si} \quad (\text{Ecuación 45})$$

dónde F_i es asumido que disminuye linealmente con la profundidad. La fracción de raíces F_i es estimada diariamente para cada capa en base a la profundidad diaria del sistema de raíces la cual es calculada por el módulo de desarrollo del cultivo. Por lo tanto, F_i depende solamente de la profundidad de raíces y el espesor de la capa i .

Asumiendo que la planta ajusta su conductancia de acuerdo a la demanda de agua en la canopia, un dado consumo de agua puede ser expresado como:

$$U = G_p (\psi_{save} - \psi_L^*) \quad (\text{Ecuación 46})$$

dónde $G_p = G_{pmax} f$.

La transpiración potencial T_p , es calculada según la partición de ETP en E_p y T_p de acuerdo a la fracción de intercepción de la canopia f a la radiación incidente como:

$$T_p = f ETP \quad (\text{Ecuación 47})$$

Usando *Ecuación 49*, es encontrado el ψ_L^* requerido para mantener un dado nivel de consumo de agua, y luego, ψ_L^* es usado en *Ecuación 45* para calcular la absorción de agua en cada capa. Antes de este cálculo, U es comparado con T_p para determinar si la transpiración es limitada por factores atmosféricos o factores de suelo. Las ecuaciones para estimar ψ_L^* son de la siguiente forma:

$$\psi_L^* = \psi_{save} \frac{T_p}{G_p} \quad \text{para } U_{max} > T_p \quad (\text{Ecuación 48})$$

$$\psi_L^* = \psi_{save} \frac{U_{max}}{G_p} \quad \text{para } T_p > U_{max} \quad (\text{Ecuación 49})$$

4. Crecimiento y desarrollo del cultivo

El crecimiento es la acumulación de materia seca e influye el balance de agua mediante cambios en el índice de área foliar y profundidad de raíces, los cuales cambian la interceptación, la transpiración y la evaporación (Campbell & Stockle, 1993).

La tasa de desarrollo de un cultivo está controlada, entre otros factores, por tiempo térmico. A su vez se asume que la tasa de desarrollo está linealmente relacionada con la temperatura. Las unidades de tiempo térmico son días grados. La acumulación de tiempo térmico para completar las etapas de desarrollo está expresada como:

$$\tau_i = \sum_i (T_i - T_b) \Delta t \quad (\text{Ecuación 50})$$

$$T_i = T_b \text{ cuando } T_a < T_b$$

$$T_i = T_c \text{ cuando } T_a > T_c$$

$$\text{Si no } T_i = T_a$$

dónde T_i es la temperatura del organismo al tiempo i . T_b es la temperatura base, por debajo de la cual, la tasa de desarrollo se detiene. T_a es la temperatura media del aire diaria y T_c es la temperatura límite para desarrollo.

Días Grados son acumulados desde la siembra a lo largo de la estación de crecimiento. El tiempo térmico acumulado requerido para completar cada etapa del cultivo, la temperatura base T_b y la temperatura límite T_c son suministrados al modelo como parámetros de cultivo.

El crecimiento de cultivo es calculado como el mínimo del crecimiento limitado por agua y el crecimiento limitado por luz. El crecimiento limitado por luz se basa en la relación lineal entre la acumulación de biomasa y la radiación solar interceptada (Monteith, 1977):

$$B = e f S_t \quad (\text{Ecuación 51})$$

dónde B es la producción diaria de biomasa ($\text{kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), e es la eficiencia de conversión de energía solar en biomasa o eficiencia en el uso de la radiación (kg MJ^{-1}), f es la fracción de la radiación incidente interceptada por la canopia, y S_t es la radiación global incidente diaria ($\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

La eficiencia de conversión de energía solar en biomasa e se suministra al modelo como un parámetro de cultivo y caracteriza la capacidad de producción de biomasa por unidad de radiación interceptada. La fracción de interceptación f , es una función exponencial del índice de área foliar (LAI , $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) y se expresa como:

$$f = 1 - e^{-K LAI} \quad (\text{Ecuación 52})$$

dónde K es el coeficiente de extinción medio de la canopia para la radiación solar, el cual toma valores de alrededor de 0,5 para canopias que tienen distribución de los ángulos de la hojas de tipo esférico.

El índice de área foliar (LAI) es calculado diariamente como una función del incremento diario de biomasa de hojas ($ldmi$) y de un parámetro de cultivo, el área específica de la hoja (SLA , $m^2 kg^{-1}$) como:

$$LAI = ldmi \times SLA \quad (\text{Ecuación 53})$$

dónde $ldmi$ es estimado en base a la fracción que es aportado a hojas ($fleaf$) del incremento diario total de biomasa ($tdmi$) y toma la forma de:

$$ldmi = fleaf \times tdmi \quad (\text{Ecuación 54})$$

dónde $fleaf$ se computa como:

$$fleaf = \frac{1}{(1 + lsp \ TDM)^2} \quad (\text{Ecuación 55})$$

dónde lsp es un coeficiente de partición hoja-tallo ($kg m^{-2}$), que controla la fracción de biomasa que se particiona a hojas (un valor de cero toda la biomasa se particiona a hojas), y TDM es la biomasa acumulada ($kg m^{-2}$). Lsp es otro parámetro de cultivo que está estrechamente relacionado a SLA .

Senescencia foliar se computa mediante el control diario de la edad de la hojas, la cual se expresa en unidades de tiempo térmico. Diariamente, el modelo remueve de la canopia y la LAI actual la porción de hojas que hayan llegado a cumplir su edad límite. Esa edad límite se llama duración de hojas, se expresa en días grados y se la debe ingresar al modelo como un parámetro de cultivo. Crecimiento de cultivo limitado por agua se computa con una ecuación propuesta por Tanner and Sinclair (1983):

$$B = \frac{kT}{VPD} \quad (\text{Ecuación 56})$$

dónde k es un parámetro de cultivo que se obtiene experimentalmente a partir de la relación existente entre producción de biomasa y uso del agua. T es la transpiración del cultivo y es tomada del módulo de balance de agua en el suelo y VPD es el déficit de presión de vapor diario.

Si el suministro de agua a las hojas se restringe, la pérdida de agua también se restringe y por lo tanto la tasa de asimilación de CO_2 y la producción de materia seca. El vínculo entre pérdida de agua y asimilación de carbono explica la evidencia experimental de que transpiración y producción de materia seca se encuentran íntimamente relacionadas. La ecuación sugiere que la materia seca producida es directamente proporcional a la transpiración e inversamente proporcional al déficit de presión de vapor. Cuando B toma unidades de $kg m^{-2}$, transpiración de mm (o kg) de agua m^{-2} y DPV unidades de Pa, por lo tanto las unidades de k son Pa. Valores típicos de k para plantas de C3 están entre 4 y 6 Pa y para C4 de 7 a 9, en ambos casos dependiendo de la especie.

La materia seca cosechable se determina, para un cultivo de crecimiento determinado como maíz, distribuyendo a granos o producto cosechable todo el incremento diario de materia seca una vez

alcanzada la etapa de floración. Además, puede redistribuirse una parte de la biomasa acumulada al producto cosechable. Para un cultivo de crecimiento indeterminado, la distribución de materia seca después de la etapa de floración, es compartida entre crecimiento vegetativo y reproductivo. Esta etapa, en la cual ambos crecimientos reciben una fracción del crecimiento diario, culmina en punto en el ciclo del cultivo a partir del cual toda la biomasa es distribuida al crecimiento reproductivo. Este punto es llamado llenado de grano neto y se lo ingresa como entrada al modelo como un parámetro de cultivo. Sus unidades son de tiempo térmico en días grados. La profundidad diaria de raíces, la cual se necesita en el módulo que estima el balance de agua en el suelo, se computa de acuerdo a Borg & Grimes (1986), como:

$$D^* = \frac{1}{\left[1 + 44.2 \exp(-8.5t^*)\right]} \quad (\text{Ecuación 57})$$

dónde D^* es una variable adimensional y es una fracción de la profundidad máxima alcanzable por el cultivo, cuyo valor en metros se lo ingresa al modelo como un parámetro de cultivo. t^* es un tiempo adimensional que es una fracción del tiempo para alcanzar la profundidad máxima. Este tiempo adimensional se computa en base a tiempo térmico.

Un factor de estrés hídrico es calculado con el objeto de modificar el crecimiento diario de área foliar si existen condiciones de estrés hídrico. Este estrés toma la forma de (Stockle, 1983):

$$SI = 1 - \frac{T}{T_p} \quad (\text{Ecuación 58})$$

dónde T es la transpiración actual, la cual surge de la integración de la Ecuación 45 cubriendo las capas con raíces y T_p es la transpiración potencial de acuerdo a la Ecuación 50.

Además, un factor de estrés diario ponderado ($AveStress_d$) por condiciones anteriores al día en cuestión es computado con el objeto de modificar la redistribución de materia seca durante la etapa reproductiva:

$$AveStress_d = a \times AveStress_{d-1} + (1-a)SI \quad (\text{Ecuación 59})$$

dónde a es un coeficiente empírico de campo estimado en base a condiciones de estrés observados. Este factor de estrés suaviza la presencia de un estrés extremo, o condiciones hídricas óptimas repentinas, que se da en un día determinado de acuerdo a las condiciones de estrés de días anteriores.

5. Bibliografía

- BORG, H. & D. W. GRIMES. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans. ASAE* 29:194-197.
- BRISTOW, R. R. & G. S. CAMPBELL. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.*, 31:159-166.
- CAMPBELL, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117:311-314.
- CAMPBELL, G. S. 1985. *Soil Physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems*. Elsevier Science

- Publishers B. V. Amsterdam. 150 p.
- CAMPBELL, G. S. 1996. *Lecture notes of the course: Systems in integrated crop management*. Department of Crop and Soils Sciences. Washington State University.
- CAMPBELL, G. S. 1998. *Soil Physics with BASIC. Transport models for soil-plant systems*. Washington State University. Pullman. WA. USA.
- CAMPBELL, G. S. & C. O. STOCKLE. 1993. *Prediction and simulation of water use in agricultural systems*. In: International Crop Science, Crop Science of America, Madison, p. 67-73.
- CLOTHIER, B. E., K. L. CLAWSON, P.J. PINTER, JR., M. S. MORAN, R. J. REGINATO, & R. D. JACKSON. 1986. Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. *Agric For. Meteorol.*, 37:319-329.
- FERRER, A. F. 1996. *A model for assessing crop response and water management in saline conditions*. Masters Thesis. Department of Biological Systems Engineering. Washington State University, Pullman, Washington.
- GARDNER, W. R. 1958. Some steady state solutions to the unsaturated flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85:228-232.
- MARCOS, J. 1997. *Corn Production under dryland conditions in Eastern Washington*. Masters Thesis, Department of Crop and Soil Sciences. Washington State University, Pullman, Washington, USA.
- MARCOS, J. & G. S. CAMPBELL. 2002. *SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos*. Río Cuarto, Argentina.
- MONTEITH, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281:277-294.
- MONTEITH, J. L. & M. H. UNSWORTH. 1990. *Principles of environmental Physics*, 2nd ed. Butterwoths, London.
- SMITH, M., R. G. ALLEN, J. L. MONTEITH, A. PERRIER, L. PEREIRA & A. SEGEREN. 1991. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization on the United Nations, Rome, Italy.
- STOCKLE, C. O. 1983. *Modeling water stress effects on corn growth*. Masters Thesis, Washington State University, Pullman, Washington, USA.
- TANNER, C. B. & T. R. SINCLAIR. 1983. *Efficient water use in crop production: research or re-search?*. In: H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair (eds.), Limitations to efficient water use in crop production, ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, pp. 1-27.

Apéndice 2: RESUMEN DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE PARÁMETROS DEL MODELO SWB

Parámetros de Trigo	n	Promedio	Desvío	Máximo	Mínimo	Fuente
<i>Parámetros crecimiento del cultivo</i>						
Coefficiente transpiración-biomasa (k_b) -Pa	13	4,65	1,62	8	2,2	a.b.h.l.j.k.aj.at.au.
Eficiencia de uso de la radiación (e) - g MJ ⁻¹	11	2,84	0,78	4,5	1,26	a.b.c.g.k.aa.ab.ac.ae.ag.al.
<i>Parámetros relación agua-suelo</i>						
Potencial agua para el cierre estomático (ϕ_{sc}) -J kg ⁻¹	3	-1668	334	-1333	-2000	a.b.k.
Potencial agua para marchites (ϕ_{sc}) - J kg ⁻¹	3	-2500	500	-2000	-3000	a.b.k.
Máxima transpiración diaria - mm día ⁻¹	4	12,5	2,65	15	9	a.b.k.
<i>Parámetros morfológicos</i>						
Máxima profundidad radical - (P_r) - m	4	1,45	0,24	1,7	1,2	a.b.k.
Área foliar específica (SLA) -m ² kg ⁻¹	2	20	5,66	24	16	a.k.
Coefficiente de partición hoja-tallo (lsp) - kg m ⁻²	2	3,3	1,84	4,6	2	a.k.
Duración foliar - (D_f) - grados días	2	750	70,7	800	700	a.k.
Coefficiente de extinción solar (k)	4	0,55	0,18	0,8	0,37	a.c.g.k.
<i>Parámetros de desarrollo</i>						
Temperatura base (T_b) - °C	3	1,6	1,51	3	0	a.b.k.
Temperatura máxima (T_x) - °C	2	35	0	35	35	a.b.

Referencias: n: número de datos.

Parámetros de Soja	n	Promedio	Desvío	Máximo	Mínimo	Fuente
<i>Parámetros crecimiento del cultivo</i>						
Coefficiente transpiración-biomasa (k_b) -Pa	4	2,73	1,19	4	1,64	d.ar.as.ap
Eficiencia de uso de la radiación (e) - g MJ ⁻¹	5	1,8	0,46	2,5	1,2	f.am.an.ao.ap.
<i>Parámetros relación agua-suelo</i>						
Potencial agua para el cierre estomático (ϕ_{sc}) -J kg ⁻¹	2	-1050	71	-1000	-1100	f.y.
Potencial agua para marchites (ϕ_{sc}) - J kg ⁻¹	2	-2000	707	-1500	-2500	f.y.
Máxima transpiración diaria - mm día ⁻¹	1	12	-	-	-	f.
<i>Parámetros morfológicos</i>						
Máxima profundidad radical - (P_r) - m	2	1,85	0,21	2	1,7	d.u.
Área foliar específica (SLA) -m ² kg ⁻¹	2	30,2	3,18	32,5	28	d.r.
Coefficiente de partición hoja-tallo (lsp) - kg m ⁻²	1	3,0	-	-	-	d.
Duración foliar - (D_f) - grados días	1	1000	-	-	-	d.
Coefficiente de extinción solar (k)	2	0,44	0,03	0,46	0,42	d.w.
<i>Parámetros de desarrollo</i>						
Temperatura base (T_b) - °C	2	8	2,83	10	6	f.u.
Temperatura óptima (T_o) - °C	2	22,5	3,54	25	20	t.f.
Temperatura máxima (T_x) - °C	2	43	1,41	44	35	v.

Parámetros de Maíz	n	Promedio	Desvío	Máximo	Mínimo	Fuente
Parámetros crecimiento del cultivo						
Coefficiente transpiración-biomasa (k_b) - Pa	11	8,28	1,81	10,4	4,38	e.d.l.m.k.n.ad.au.
Eficiencia de uso de la radiación (e) - g MJ ⁻¹	12	3,5	0,82	4,5	2,6	e.d.f.m.k.z.ad.af.ah.ai.ak.an.
Parámetros relación agua-suelo						
Potencial agua para el cierre estomático (ϕ_{psc}) - J kg ⁻¹	7	-1143	113	-1000	-1300	f.m.k.n.ad.
Potencial agua para marchites (ϕ_{sc}) - J kg ⁻¹	7	-1736	232	-1400	-2000	f.m.k.n.ad.
Máxima transpiración diaria - mm día ⁻¹	3	12	1,53	14	11	f.k.ad.
Parámetros morfológicos						
Máxima profundidad radical - (P_r) - m	8	1,8	0,49	2,8	1,3	e.d.l.m.k.n.ad.
Área foliar específica (SLA) - m ² kg ⁻¹	6	20,2	2,35	24	18	d.l.m.k.s.ad.
Coefficiente de partición hoja-tallo (lsp) - kg m ⁻²	6	3,3	1,34	5,8	2	e.d.f.m.k.ad.
Duración foliar - (D_f) - grados días	6	1025	189	1200	800	e.d.l.m.k.ad.
Coefficiente de extinción solar (k)	5	0,5	0,12	0,7	0,4	f.k.r.ad.
Parámetros de desarrollo						
Temperatura base (T_b) - °C	5	7,1	1,34	8	5,2	a.k.n.p.ad.
Temperatura óptima (T_o) - °C	3	31	5,13	35	25	o.p.q.
Temperatura máxima (T_x) - °C	3	31	12	44	23	d.q.ad.

REFERENCIAS

- a Pala, M.; Stockle, C. & H. Harris. 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
- b Pannkuk, C.; Stockle, C. & R. Papendick. 1998. Evaluating Cropsyst simulations of wheat management in a wheat-fallow region of the US Pacific Northwest. *Agric. Syst.* 57: 121-134
- c Abbate, P.; Andrade, F.; Culot, J. & P. Bindraban. 1997. Grain yield in wheat: effects of radiation during spike growth period. *Field Crop Res.* 54: 245-257.
- d Stockle, C.; Cabelguenne, M.; & P. Debaeke. 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. *Eur. J. Agron.* 7: 89-98.
- e Bellocchi, G.; Silvestri, N; Mazzoncini, M. & S. Menini. 2002. Using the Cropsyst model in continuous rainfed maize (*Zea mays L.*) under alternative management options. *Ital. J. Agron.* 6: 43-56.
- f Stockle, C. & R. Nelson. 1999. Cropping Systems simulation model - User's online manual. Biological Systems Engineering Dept. Washington State University, Pullman (available at: <http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst>).
- g Singh, R.; van Dam, J. & R. Feddes. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agric. Water Manage.* 82: 253-278.
- h Siddique, K.; Tennant, D.; Perry, M. & M. Beldford. 1990. Water use and water use efficiency of old and modern wheat cultivars on a Mediterranean-type environment. *Aust. J. Agric. Res.* 41: 431-447.
- i Gregory, P.; Tennant, D. & R. Beldford. 1992. Root and shoot growth, and water and light use efficiency of barley and wheat crops grown on a shallow duplex soil a Mediterranean-type environment. *Aust. J. Agric. Res.* 43: 555-573.
- j Connor, A.; Richards, R.; & G. Farquhar. 1992. The effect of variation in soil water availability, vapor pressure deficit and nitrogen nutrition on carbon isotope discrimination in wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 43: 935-947.
- k Marcos, J. 2000. Simulation-based assessment of alternative crops in the dryland Pacific Northwest. Ph. D. Dissertation. Washington State University. 171 pp.
- l Ferrer-Alegre, F. y C. Stockle. 1999. A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.* 19: 15-23.
- m Marcos, J. 1997. Corn production under dryland conditions in eastern Washington. MSc. Dissertation. Washington State University.
- n Espósito, G. 2002. Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranzas en cultivo de maíz. Tesis de MSc. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- o Cohelo, D.; & R. Dale. 1980. An energy- crop growth and temperature function for predicting corn growth and development, planting to silking. *Agron. J.* 62: 503-510

- p Kiniry, J. *et al.* EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great Plains region. *Can. J. Plant Sci.* 75: 679-688.
- q Wareing, P. & A. Galston. 1999. The germination of seeds.
- r Penning de Vries, F.; Jansen, D.; Ten Berge, H. & A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annuals crops. *Simulation Monograph* 29. Pudoc. Wageningen.
- s Sibma, L. 1987. *Ontwikkeling en groei van mais (zea mays L.)*.
- t Williams, J.; Jones, C.; Kiniry, J. & D. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. *Trans. ASAE.* 32: 497-511.
- u Fauconier, D. 1986. Soya. Fertilising for high yield. *IPI. Bulletin* 1: 3-60.
- v Norman, A. 1983. Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja. *Hemisferio Sur. Bs. As. (Argentina)* 244 p.
- w Eastin, J. *et al.* 1969. Physiological aspects of crop yields. *ASA y Crop. Sci. Soc. of Am.* 396p.
- y Hesketh, J. & J. Jones. 1980. Predicting photosynthesis for ecosystems models. Vol. 1, CRC Press. 273 p.
- z Eart, H. & R. Davis. 2003. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agron. J.* 95: 688-696.
- aa Fischer, R.A. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crop Res.* 33: 57-80.
- ab Yunusa, I.A.M., K.H.M. Siddique, R.K. Bedford, & M.M. Karimi. 1993. Effect of canopy structure on efficiency of radiation interception and use of spring wheat cultivars during the preanthesis period in a Mediterranean-type environment. *Field Crop Res.* 35: 113-122.
- ac Major, D.J., H.H. Janzen, R.S. Sadasivaiah, & J.M. Carefoot. 1992. Morphological characteristics of wheat associated with high productivity. *Can. J. Plant Sci.* 72: 689-698.
- ad Ferrer, F. Villar, J.M. & C.O. Stockle. 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. *Invest. Agr. Prot. Veg.* 15: 237-251
- ae Sinclair, T.R. & Q. Bai. 1997. Analysis of wheat yields in northwest China. *Agric. Syst.* 53: 373-385.
- af Kiniry, J.R.; Landivar, J.A.; Witt, M.; Gerik, T.J.; Cavero, J. & L.J. Wade. 1998. Radiation-use efficiency response to vapor pressure deficit for maize and sorghum. *Field Crop Res.* 56: 265-270.
- ag Albrizio, R. & P. Steduto. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. I. Radiation use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 130: 254-268.
- ah Lindquist, J.L.; Arkebauer, T.J.; Walters, D.T.; Cassman, K.G. & A. Dobermann. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agron. J.* 97: 72-78.
- ai Otegui, M.E.; Nicolini, M.G.; Ruiz, R.A. & P.A. Dodds. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33.
- aj Abbate, P.E.; Dardanelli, J.L.; Cantarero, M.G.; Maturano, M.; Melchiori, R.J.M. & E.E. Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci.* 44: 474-483.
- ak Andrade, F.H.; Uhart, S.A. & A.G. Cirilo. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crop Res.* 32: 17-25.
- al Calderini, D.F.; Dreccer, M.F. & G.A. Slafer. 1997. Consequences of plant breeding on biomass growth, radiation interception and radiation use efficiency in wheat. *Field Crop Res.* 52: 271-281.
- am Muchow, R.C.; Robertson, M.J. & B.C. Pengelly. 1993. Radiation-use efficiency of soybean, mung bean and cowpea under different environmental conditions. *Field Crop Res.* 32: 1-16.
- an Andrade, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean at Balcarce, Argentina. *Field Crop Res* 41: 1-12.
- ao Andriani, J.M.; Andrade, F.H.; E.E. Suero & J.L. Dardanelli. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybean. I. Their effect on dry matter accumulation, seed yield and yield components. *Agronomie* 11: 737-746.
- ap Sinclair, T.R. & T. Horie. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Sci.* 29: 90-98.
- aq Muchow, R.C.; Sinclair, T.R. & J.M. Bennett. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agron. J.* 82: 338-343.
- ar Tanner, C.B. & T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.) *Limitations to efficient water use in crop production.* ASA-SCPA-SSSA. Madison, USA.
- as Caviglia, O.P.; Sadras, V.O. & F.H. Sadras. 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 Crop Res.* 87: 117-129.
- at Oweis, T.; Zhang, H. & M. Pala. 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a mediterranean environment. *Agron. J.* 92: 231-238.
- au Howell, T.A.; Steiner, J.L.; Schneider, A.D.; Evett, S.R. & J.A. Tolck. 1996. Seasonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum, and corn - southern high plains. *Trans. ASAE* 40:

- 623-634.
- av Howell, T.A.; Tolk, J.A.; Schneider, A.D. & S.R. Evett. 1998. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agron. J.* 90: 3-9.
- aw Dardanelli, J.L.; Suero, E.E.; Andrade, F.H. & J. Andriani. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators. *Agronomie* 11: 747-756.

Apéndice 3: RESUMEN DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE PARAMETRIZACIÓN DE MODELOS

Tabla 19. Resumen de estadísticos de parametrización de varios modelos utilizados a nivel mundial.

Rendimiento								
ID	Modelo	Lugar	Cultivo	n	RMSE (kg ha ⁻¹)	RRMSE (%)	d	Referencia
1	APSIM	Mallee, Australia	Trigo	110	250.0			Sadras <i>et al.</i> (2003)
2	BUDGET	Mornag, Tunisia	Trigo	4	200.5	7.8%		Raes <i>et al.</i> (2006)
		Kou valley, Burkina Faso	Maíz	6	1629.5	32.0%		Raes <i>et al.</i> (2006)
3	CropSyst	Logan, UT	Trigo	48	413.0	9.3%	0.98	Stockle <i>et al.</i> (1994)
		Norte de Siria		32	555.0	28.5%	0.91	Pala <i>et al.</i> (1996)
		Winona, WA		92	403.8	11.7%	0.93	Pannkuk <i>et al.</i> (1998)
		Auzeville, Francia	Soja	54	448.2	15.8%	0.96	Stockle <i>et al.</i> (1997)
		Auzeville, Francia	Maíz	54	1912.0	24.0%	0.95	Stockle <i>et al.</i> (1997)
		Davis, CA		28	724.0	8.1%	0.95	Stockle <i>et al.</i> (1994)
		Valle de Ebro, España		19	1180.0	9.6%	0.82	Ferrer <i>et al.</i> (2000)
		Davis, CA		16	882.5	9.7%		Ferrer & Stockle (1999)
		Fort Collins, CO		24	762.7	16.9%	0.86	Ferrer & Stockle (1999)
4	DSSAT-CERES	Tribune, KS	Trigo	30	678.5	25.4%		Staggenborg & Vanderlip (2005)
		Buenos Aires, Argentina		77	721.6	25.4%		Monzón <i>et al.</i> (2007)
5	DSSAT-CROPGRO	Georgia	Soja	347	356.4	15.1%	0.93	Mavromatis <i>et al.</i> (2002)
		Carolina del Norte		532	434.3	16.7%	0.87	Mavromatis <i>et al.</i> (2002)
		Georgia		226	483.5	21.0%		Irmak <i>et al.</i> (2000)
		Georgia		393	445.6	18.9%	0.84	Mavromatis <i>et al.</i> (2000)
		Buenos Aires, Argentina		155	584.0	17.0%		Mercau <i>et al.</i> (2007)
6	EPIC	Varios países	Trigo	1020		7.0%	0.96	Liu <i>et al.</i> (2007)
7	FARMSIM	Harare, Zimbawe	Maíz	115	862.0	47.3%		Tittonell <i>et al.</i> (2007)
8	RZWQM	Sorraia, Portugal	Maíz		635			Camêra <i>et al.</i> (2005)
9	TW	Walpeup, Australia	Trigo	96	780.0	35.0%		Lata & O'Leary (2003)

Referencias: n: número de datos, RMSE: Raíz del Error Medio Cuadrático, RRMSE: Raíz del Error Medio Cuadrático Relativo, d: Índice de Agregación de Willmott.

Biomasa								
ID	Modelo	Lugar	Cultivo	n	RMSE (kg ha ⁻¹)	RRMSE (%)	d	Referencia
1	AquaCrop	Davis, CA	Maíz	13	2735.7	11.3%	0.97	Hsiao <i>et al.</i> (2009)
2	CropSyst	Logan, UT	Trigo	48	953.5	10.8%	0.98	Stockle <i>et al.</i> (1994)
		Norte de Siria		32	950.0	13.0%	0.94	Pala <i>et al.</i> (1996)
		Valle de Ebro, España	Maíz	19	2200.0	9.6%	0.74	Ferrer <i>et al.</i> (2000)
		Auzeville, Francia		54	3232.8	17.0%	0.96	Stockle <i>et al.</i> (1997)
		Davis, CA		28	1246.0	7.6%	0.95	Stockle <i>et al.</i> (1994)
		Davis, CA		16	1780.5	10.4%	0.94	Ferrer & Stockle (1999)
		Fort Collins, CO		24	594.3	4.8%	0.97	Ferrer & Stockle (1999)
3	DSSAT-CROPGRO	Valle Guadalquivir, España	Vicia	98	1606.4		0.84	Sau <i>et al.</i> (2004)
		Buenos Aires, Argentina	Soja	115	1054.0	16.0%		Mercau <i>et al.</i> (2007)
4	FARMSIM	Harare, Zimbawe	Maíz	115	2765.0	64.7%		Tittonell <i>et al.</i> (2007)
5	RZWQM	Sorraia, Portugal	Maíz		450.0	2.1%		Camêra <i>et al.</i> (2005)



Consumo de Agua								
ID	Modelo	Lugar	Cultivo	n	RMSE (mm)	RRMSE (%)	d	Referencia
1	APSIM	Tel Hadya, Siria	Trigo		22.3	5.20%		Moeller <i>et al.</i> (2007)
2	CropSyst	Norte de Siria	Trigo	32	29.5	9.00%	0.95	Pala <i>et al.</i> (1996)
		Winona, WA		80	36.8	12.80%	0.87	Pannkuk <i>et al.</i> (1998)
			Soja	36	35.1	8.50%	0.97	Stockle <i>et al.</i> (1997)
		Auzeville, Francia	Maiz	36	20.7	4.98%	0.99	Stockle <i>et al.</i> (1997)
		Davis, CA		16	30.5	6.00%	0.97	Ferrer & Stockle (1999)
		Fort Collins, CO		24	23.7	5.30%	0.97	Ferrer & Stockle (1999)
3	DSSAT-CROPGRO	Washington State	Varios		38.0	20.21%	0.87	Marcos (2000)
4	ISAREG	Valle Guadalquivir, España	Vicia	98	19.3		0.99	Sau <i>et al.</i> (2004)
5	ISAREG	Stara Zagora, Bulgaria	Maiz		49.2			Popova <i>et al.</i> (2006)
6	RZWQM	Sorraia, Portugal	Maiz		12.0	3.51%		Cameira <i>et al.</i> (2005)
7	SWAP	Zaragoza, España	Maiz		3.8	0.73%		Utset <i>et al.</i> (2004)
8	SWD	China	Trigo	40	27.8			Zhang <i>et al.</i> (2004)
9	TW	Walpeup, Australia	Trigo	96	60.0	27.65%		Lata & O'Leary (2003)
9	WB	Ile - Ife, Nigeria	Vigna		5.2	3.20%		Adekalu & Fapohunda (2006)

Contenido hídrico del suelo								
ID	Modelo	Lugar	Cultivo	n	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	RRMSE (%)	d	Referencia
1	APSIM	Mallee, Australia	Trigo	276	0.002			Sadras <i>et al.</i> (2003)
2	BUDGET	Mornag, Tunisia	Trigo	6	0.032			Raes <i>et al.</i> (2006)
		Kou valley, Burkina Faso	Maiz	13	0.025			Raes <i>et al.</i> (2006)
3	CropSyst	Winona, WA	Trigo	44	0.026	17.0%	0.92	Pannkuk <i>et al.</i> (1998)
		Davis, CA			0.024	9.0%		Stockle & Jara (1998)
		Pisa, Italia		432	0.014	5.3%		Bellocchi <i>et al.</i> (2002)
		Lodi, Italia	Alfalfa			16.4%		Confalonieri & Bechini (2004)
4	DSSAT-Ceres	Maracay, Venezuela	Maiz	65	0.007	4.6%	0.86	Comerma <i>et al.</i> (1986)
5	ISAREG	Hebei, China	Trigo		0.078	6.2%		Liu <i>et al.</i> (1998)
			Maiz		0.078	6.4%		Liu <i>et al.</i> (1998)
		Stara Zagora, Bulgaria		36	0.020			Popova <i>et al.</i> (2006)
6	RZWQM	Sorraia, Portugal	Maiz	299	0.014			Cameira <i>et al.</i> (2005)
7	SHAW	Akron, CO	Rastrojo de trigo		0.050			Flerchinger <i>et al.</i> (2003)
		Pullman, WA	Rastrojo de maiz		0.060			Flerchinger <i>et al.</i> (2003)
8	SWAP	Sirsa, India	Trigo	203	0.025			Singh <i>et al.</i> (2006)
		Zaragoza, España	Maiz		0.060			Utset <i>et al.</i> (2004)
9	PWB	New Delhi, India	Trigo		0.027		0.87	Mandal <i>et al.</i> (2002)
10	WB	Ile - Ife, Nigeria	Vigna		0.006			Adekalu & Fapohunda (2006)

Referencias

- Adekalu, K.O. & Fapohunda, H.O., 2006. A numerical model to Predict Crop Yield from Soil-Water Deficit. *Biosystems Engineering* 94, 359-372.
- Bellocchi, G., Acutis, M., Fila, G., & Donatelli, M., 2002. An Indicator of Solar Radiation Model Performance based on a Fuzzy Expert System. *Agron. J.* 94, 1222-1233.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Ahuja, L., & Pereira, L., 2005. Simulating the fate of water in field soil-crop environment. *J. Hydrol.* 315, 1-24.
- Confalonieri, R. & Bechini, L., 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. *Eur. J. Agron.* 21, 223-237.
- Ferrer, F. & Stockle, C.O., 1999. A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.* 19, 15-23.
- Ferrer, F., Villar, J., & Stockle, C.O., 2000. Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz en regadío en el Valle del Ebro. *Invest. Agr. Prot. Veg.* 15, 237-251.

- Flerchinger, G.N., Sauer, T.J., & Aiken, R.A., 2003. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface. *Geoderma* 116, 217-233.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. *Agron. J.* 101, 448-459.
- Irmak, A., Jones, J.W., Mavromatis, T., Welch, S.M., Boote, K.J., & Wilkerson, G.G., 2000. Evaluating Methods for Simulating Soybean Cultivar Responses Using Cross Validation Florida Agric. Exp. Stn. Journal Series no. R-07040. This work was supported in part by Project no. 9223 of the United Soybean Board. *Agron. J.* 92, 1140-1149.
- Liu, J., Williams, J.R., Zehnder, A.J.B., & Yang, H., 2007. GEPIC – modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agric. Syst.* 94, 478-493.
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J., & Pereira, L.S., 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China plain. *Agric. Water Manage.* 36, 233-246.
- Marcos, J., 2000. Simulation-based assessment of alternative crops in the dryland Pacific Northwest., Washington State University, p. 177.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D., & Hoogenboom, G., 2001. Developing Genetic Coefficients for Crop Simulation Models with Data from Crop Performance Trials. *Crop Sci.* 41, 40-51.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Wilkerson, G.G., & Hoogenboom, G., 2002. Repeatability of Model Genetic Coefficients Derived from Soybean Performance Trials across Different States Florida Agricultural Experiment Station, Journal Series No. R-07981. *Crop Sci.* 42, 76-89.
- Mercau, J.L., Dardanelli, J.L., Collino, D.J., Andriani, J.M., Irigoyen, A., & Satorre, E.H., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Res.* 100, 200-209.
- Moeller, C., Pala, M., Manschadi, A.M., Meinke, H., & Sauerborn, J., 2007. Assessing the sustainability of wheat-based cropping systems using APSIM: model parameterisation and evaluation. *Austr. J. Agric. Res.* 58, 75-86.
- Monzon, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A., & Caviglia, O.P., 2007. Modelling management strategies for wheat–soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crop Res.* 101, 44-52.
- Pala, M., Stockle, 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.
- Pannkuk, C.D., Stockle, C.O., & Papendick, R.I., 1998. Evaluating CropSyst simulations of wheat management in a wheat-fallow region of the US pacific northwest. *Agric. Syst.* 57, 121-134.
- Popova, Z., Eneva, S., & Pereira, L.S., 2006. Model Validation, Crop Coefficients and Yield Response Factors for Maize Irrigation Scheduling based on Long-term Experiments. *Biosystems Engineering* 95, 139-149.
- Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellens, J., & Sahli, A., 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manage.* 81, 335-357.
- Sadras, V., Baldock, J., Roget, D., & Rodriguez, D., 2003. Measuring and modelling yield and water budget components of wheat crops in coarse-textured soils with chemical constraints. *Field Crop Res.* 84, 241-260.
- Sau, F., Boote, K.J., Bostick, W.M., Jones, J.W., & Mínguez, M.I., 2004. Testing and Improving Evapotranspiration and Soil Water Balance of the DSSAT Crop Models. *Agron. J.* 96, 1243-1257.
- Staggenborg, S.A., & Vanderlip, R.L., 2005. Crop Simulation Models Can be Used as Dryland Cropping Systems Research Tools. *Agron. J.* 97, 378-384.
- Stockle, C.O., Cabelguenne, M., & Debaeke, P., 1997. Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. En: Ittersum, M.K.v., Geijn, S.C.v.d. (Eds.), *Developments in Crop Science*. Elsevier, pp. 113-122.

- Stockle, C.O., Martin, S., & Campbell, G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46, 335-359.
- Tittonell, P., Zingore, S., van Wijk, M.T., Corbeels, M., & Giller, K.E., 2007. Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crop Res.* 100, 348-368.
- Utset, A., Farré, I., Martínez-Cob, A., & Caveró, J., 2004. Comparing Penman–Monteith and Priestley–Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. *Agric. Water Manage.* 66, 205-219.
- Zhang, Y., Yu, Q., Liu, C., Jiang, J., & Zhang, X., 2004. Estimation of Winter Wheat Evapotranspiration under Water Stress with Two Semiempirical Approaches. *Agron. J.* 96, 159-168.

Apéndice 4: RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO CLIMGEN

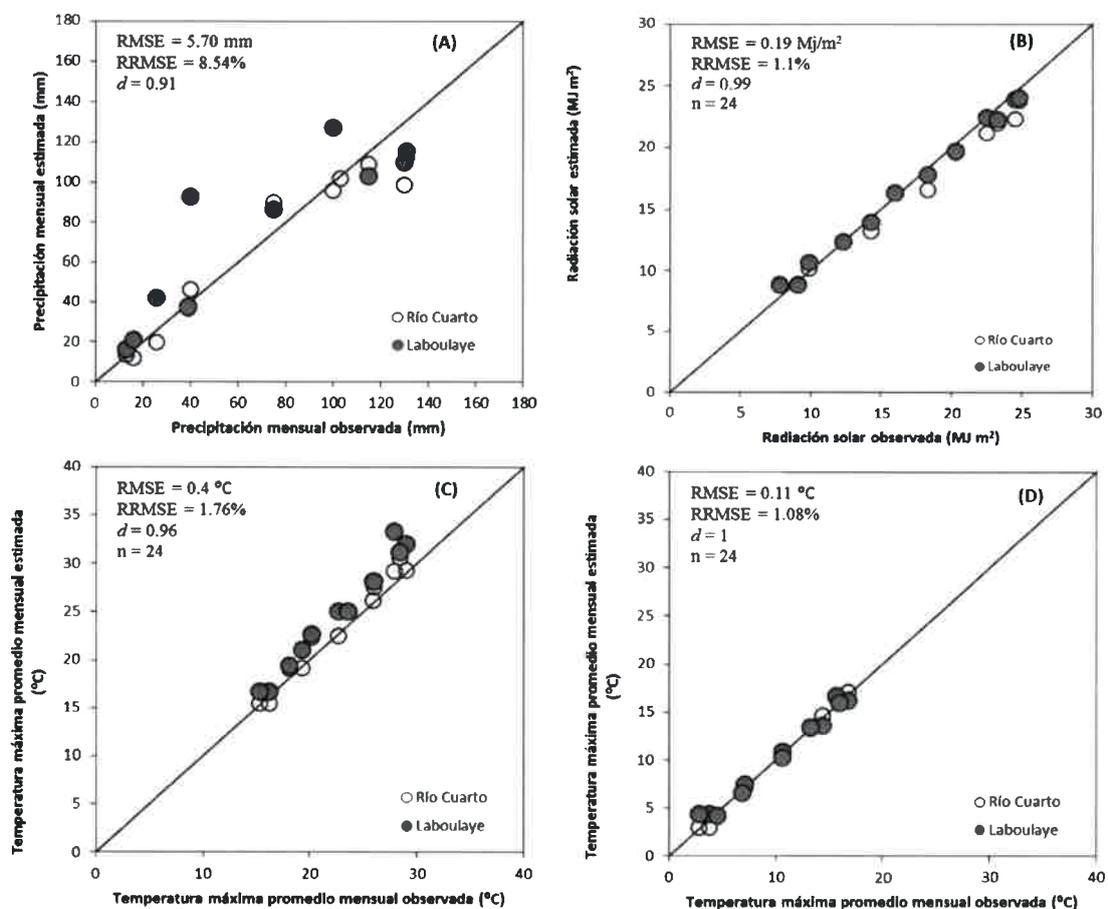


Fig. 14. Resultados de la calibración del generador climático CLIMGEN. (A) Precipitación, (B) Radiación solar, (C) Temperatura máxima y (D) Temperatura mínima.

Apéndice 5: DATOS CLIMÁTICOS DE LOS ENSAYOS DE CALIBRACIÓN DE SWB

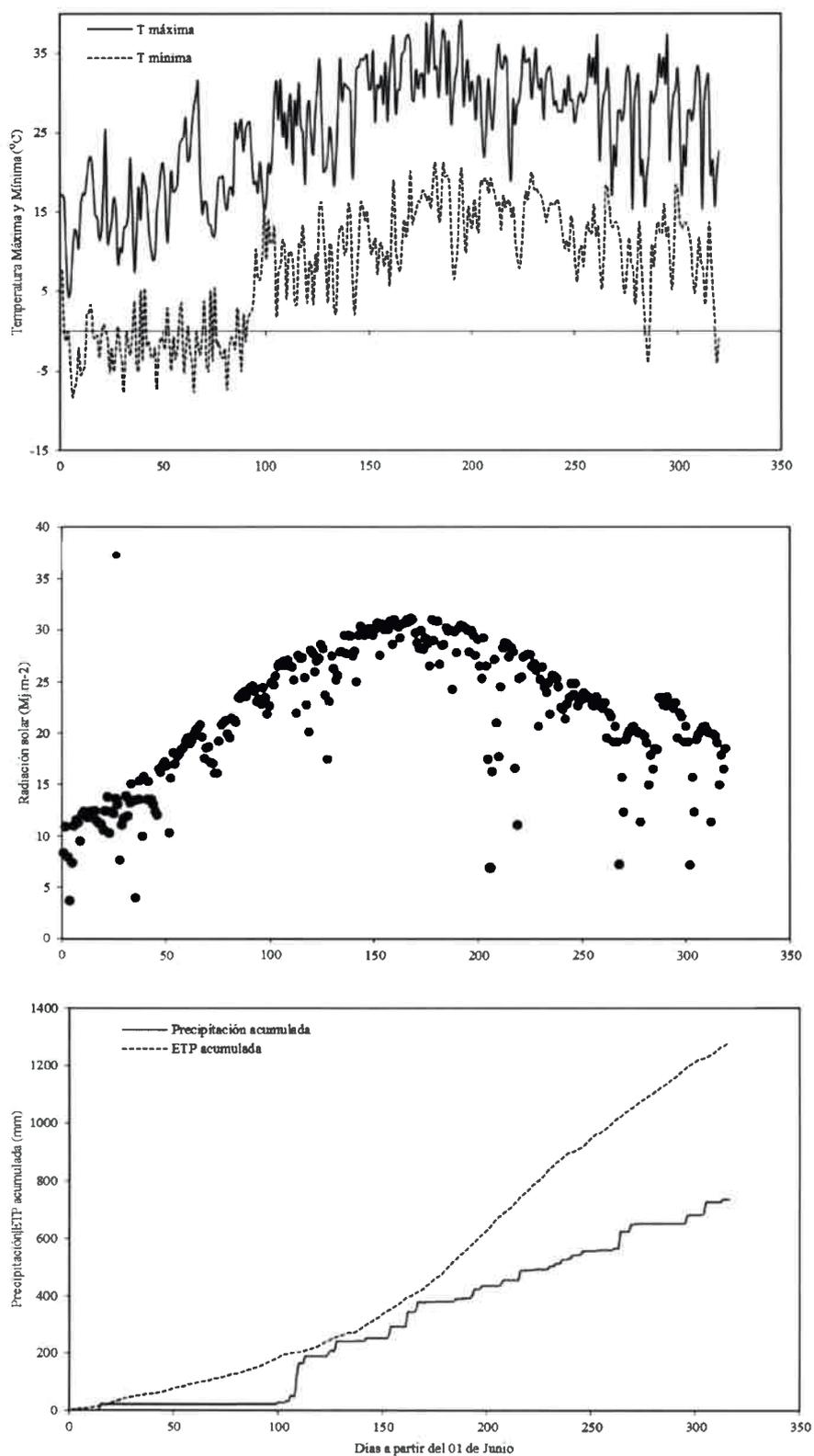


Fig. 15. Datos climáticos registrados durante los ensayos de calibración de trigo, soja y maíz en Laboulaye.

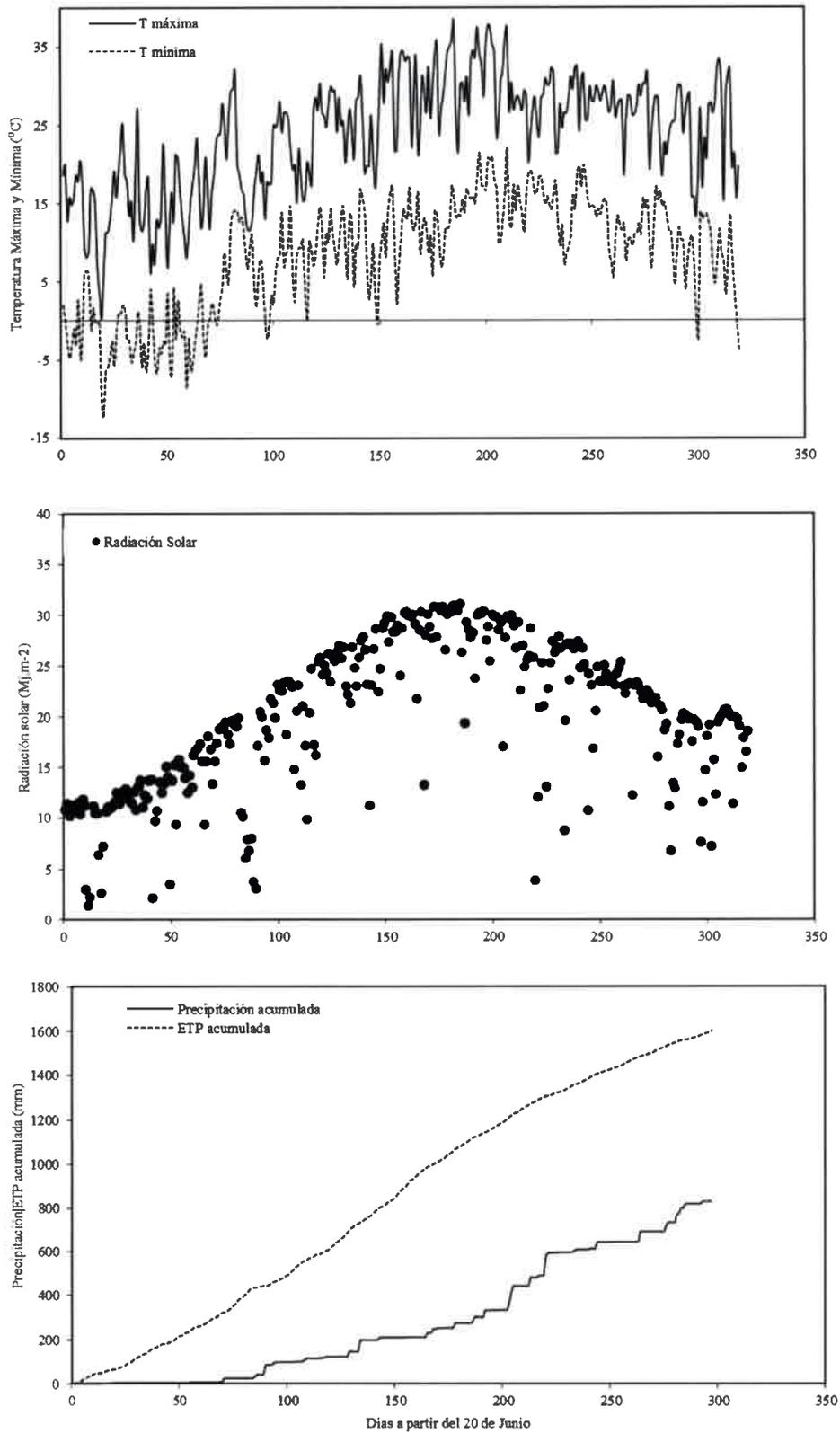


Fig. 16. Datos climáticos registrados durante los ensayos de calibración de trigo, soja y maíz en Olaeta.

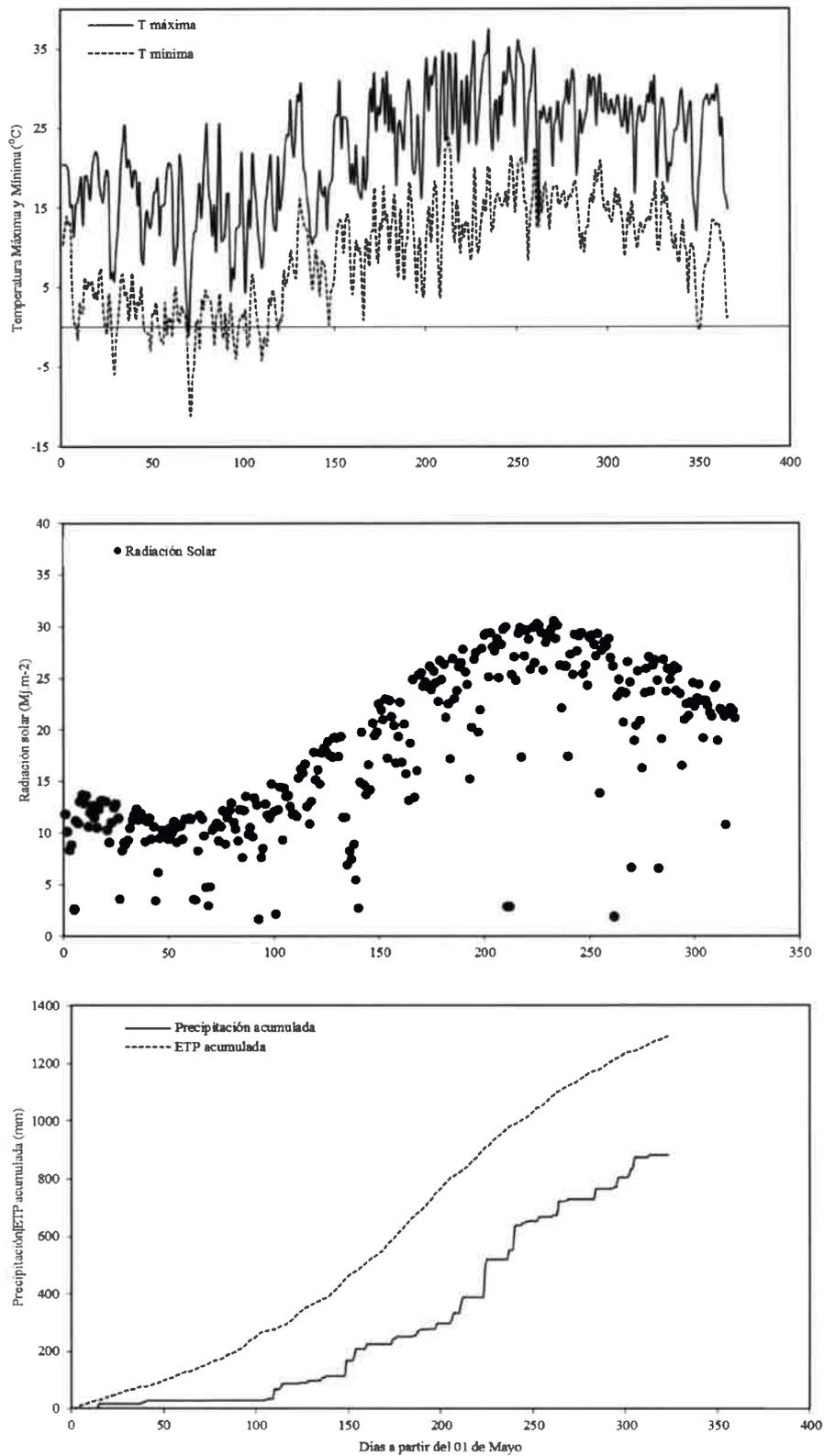


Fig. 17. Datos climáticos registrados durante los ensayos de calibración de trigo, soja y maíz en Río Cuarto.

Apéndice 6: PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO SWB

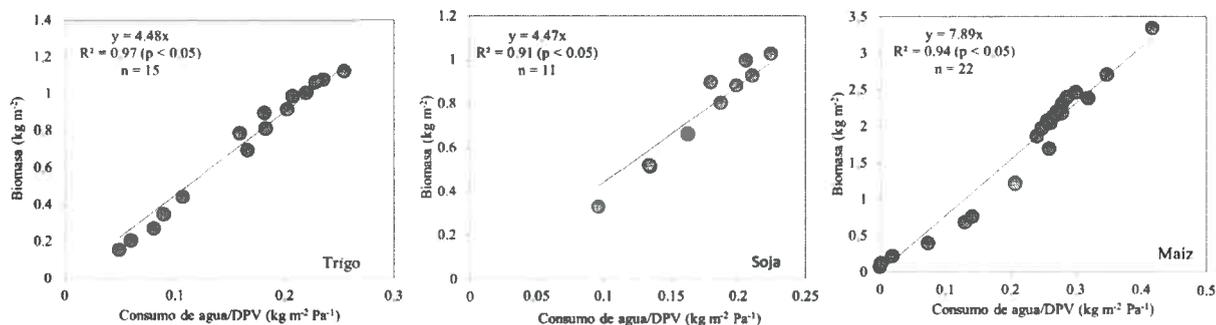


Fig. 18. Estimación del coeficiente de transpiración-biomasa de trigo, soja y maíz.

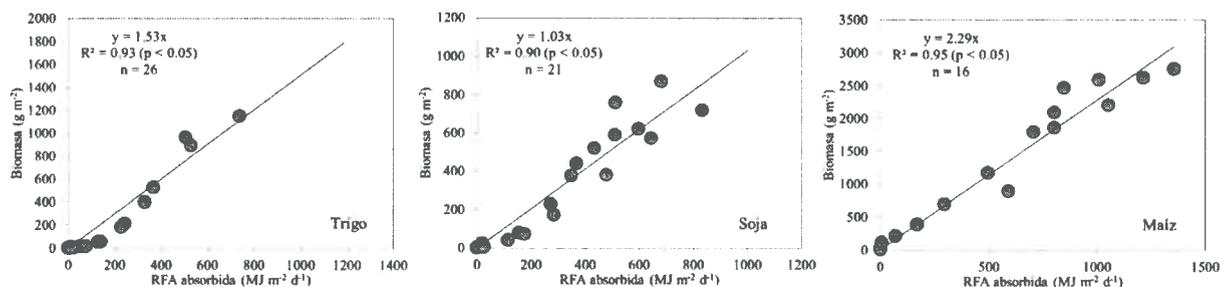


Fig. 19. Estimación de la eficiencia de uso de la radiación para trigo, soja y maíz.

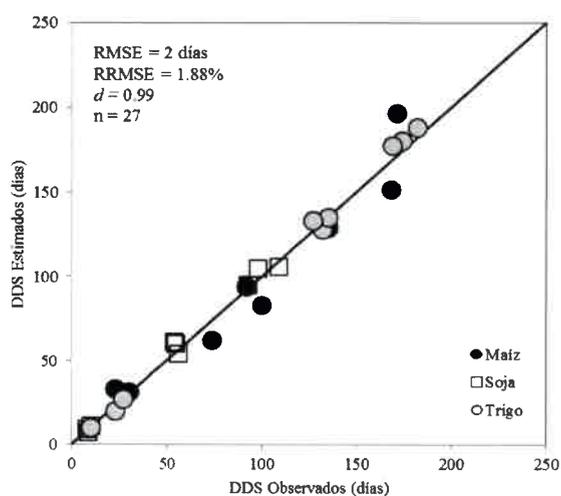


Fig. 20. Ajuste de la simulación de los estados fenológicos de los cultivos de trigo, soja y maíz. DDS: días después de la siembra.

Apéndice 7: RESULTADOS DE LA CORROBORACIÓN DEL MODELO SWB

Tabla 20. Análisis estadístico de la corroboración de la simulación de biomasa de SWB.

Cultivo	Lugar	<i>N</i>	Promedio de observados	Promedio de estimados	RMSE	RRMSE	<i>d</i>
			(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(%)	
Soja	Laboulaye	12	5202	5429	707	13.59	0.93
Maíz	Río Cuarto	18	10192	9808	575	5.64	0.97

N número de datos; RMSE raíz del error medio cuadrático; RRMSE raíz del error medio cuadrático relativo; *d* índice de agregación de Willmott.

Fuente: Magliano (2006), Videla Menseguc (2006), Espósito *et al.* (2002, 2003, 2004, 2006, 2007).

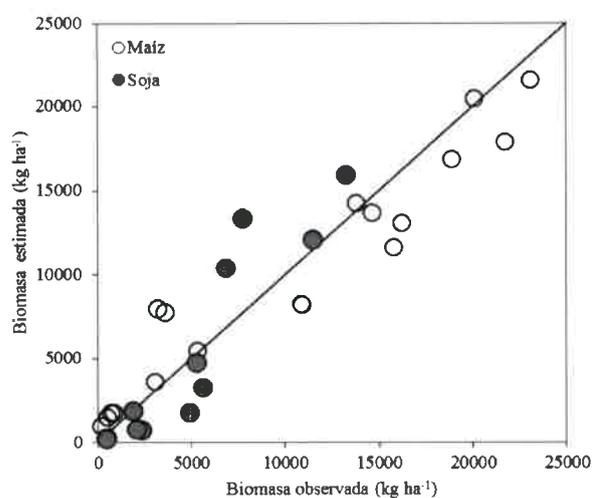


Fig. 21. Ajuste de la corroboración de la simulación de biomasa para soja y maíz de SWB.

Tabla 21. Análisis estadístico de la corroboración de la simulación de rendimiento en grano de SWB.

Cultivo	Lugar	<i>N</i>	Promedio de observados	Promedio de estimados	RMSE	RRMSE	<i>d</i>
			(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(%)	
Trigo	Laboulaye	5	3513	3411	254	7.23	0.91
	Marcos Juárez	27	4010	3966	72	1.79	0.97
	Río Cuarto	8	2692	3276	239	8.89	0.85
Soja	Laboulaye	11	3712	3793	56	1.52	0.99
	Marcos Juárez	12	3719	3886	90	2.42	0.93
	Río Cuarto	9	3458	3647	177	5.11	0.85
Maíz	Laboulaye	8	11223	11303	181	1.61	0.97
	Marcos Juárez	13	11991	11833	167	1.4	0.97
	Río Cuarto	16	10966	11085	178	1.63	0.91

N número de datos; RMSE raíz del error medio cuadrático; RRMSE raíz del error medio cuadrático relativo; *d* índice de agregación de Willmott.

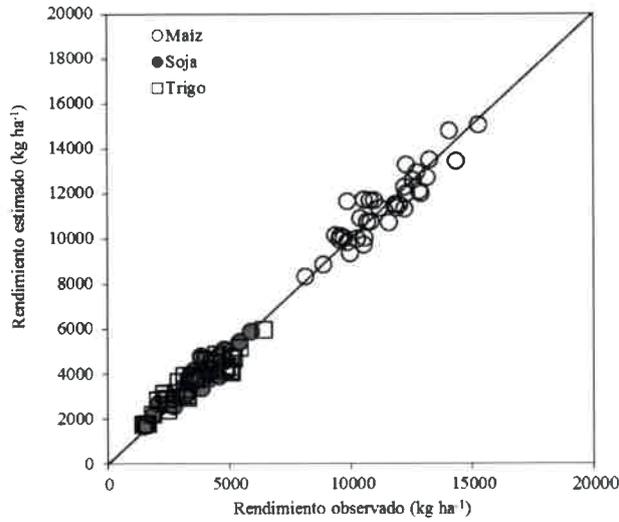


Fig. 22. Ajuste de la corroboración de la simulación de rendimiento en grano para trigo, soja y maíz de SWB.

Tabla 22. Análisis estadístico de la corroboración de la simulación de consumo de agua de SWB.

Cultivo	Lugar	<i>N</i>	Promedio de observados	Promedio de estimados	RMSE	RRMSE	<i>d</i>
			(mm)	(mm)	(mm)	(%)	
Maiz	Río Cuarto	18	253	225	12.15	4.81	0.97

N número de datos; *RMSE* raíz del error medio cuadrático; *RRMSE* raíz del error medio cuadrático relativo; *d* índice de agregación de Willmott
 Fuente: Espósito *et al.* (2002, 2003, 2004, 2006, 2007).

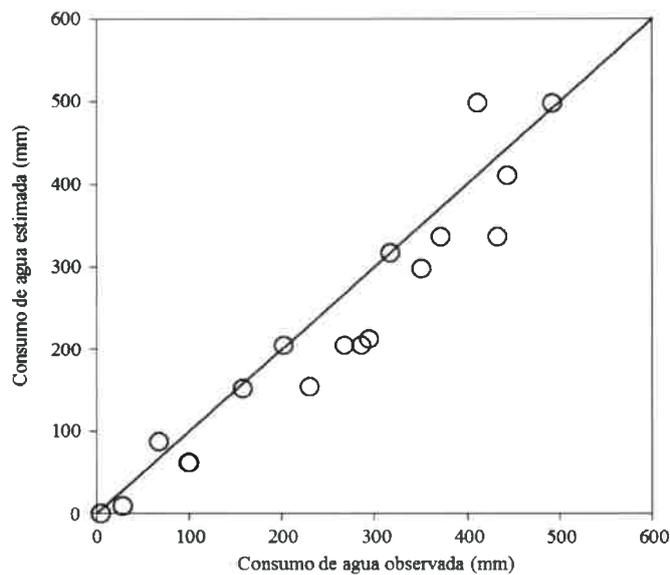


Fig. 23. Ajuste de la corroboración de la simulación de evapotranspiración de maíz de SWB.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Área de estudio.....	20
Fig. 2. Representación esquemática del modelo SWB para modelar a escala de lote. Relación de submodelos de clima, suelo, cultivo y manejo para cuantificar la disponibilidad de recursos y su dinámica temporal. ...	29
Fig. 3. Representación esquemática del submodelo de balance hídrico del modelo SWB.....	30
Fig. 4. Representación esquemática del submodelo de desarrollo del cultivo y acumulación de biomasa del modelo SWB.....	32
Fig. 5. Representación esquemática del submodelo de programación de secuencia de cultivos del modelo SWB.	35
Fig. 6. Calibración y análisis estadístico de la acumulación de biomasa de trigo.	57
Fig. 7. Calibración y análisis estadístico de la acumulación de biomasa de soja.	57
Fig. 8. Calibración y análisis estadístico de la acumulación de biomasa de maíz.	58
Fig. 9. Valores simulados y observados de biomasa durante el ciclo de los cultivos (a), rendimiento en granos (b), consumo de agua (c), y contenido hídrico del suelo (d) para trigo, soja y maíz. Referencia: círculo gris: trigo; círculo blanco: soja; y círculo negro: maíz.	58
Fig. 10. Calibración de la dinámica del agua en el suelo en trigo (Olaeta).	59
Fig. 11. Calibración de la dinámica del agua en el suelo en soja (Olaeta).....	60
Fig. 12. Calibración de la dinámica del agua en el suelo en maíz (Olaeta).	61
Fig. 13. Índice de sensibilidad de primer orden para las variables acumulación de biomasa (A), rendimiento de granos (B) y consumo de agua del cultivo (C). Las barras horizontales muestran el valor promedio del índice de sensibilidad calculado para 8 parámetros de cultivo. Las líneas indican el desvío estándar del índice obtenido de 10 muestras con un intervalo de confianza de 95%.	62
Fig. 14. Resultados de la calibración del generador climático CLIMGEN. (A) Precipitación, (B) Radiación solar, (C) Temperatura máxima y (D) Temperatura mínima.	125
Fig. 15. Datos climáticos registrados durante los ensayos de calibración de trigo, soja y maíz en Laboulaye. ...	126
Fig. 16. Datos climáticos registrados durante los ensayos de calibración de trigo, soja y maíz en Olaeta.	127
Fig. 17. Datos climáticos registrados durante los ensayos de calibración de trigo, soja y maíz en Río Cuarto... ..	128
Fig. 18. Estimación del coeficiente de transpiración-biomasa de trigo, soja y maíz.	129
Fig. 19. Estimación de la eficiencia de uso de la radiación para trigo, soja y maíz.	129
Fig. 20. Ajuste de la simulación de los estados fenológicos de los cultivos de trigo, soja y maíz. DDS: días después de la siembra.....	129
Fig. 21. Ajuste de la corroboración de la simulación de biomasa para soja y maíz de SWB.	130
Fig. 22. Ajuste de la corroboración de la simulación de rendimiento en grano para trigo, soja y maíz de SWB.	131
Fig. 23. Ajuste de la corroboración de la simulación de evapotranspiración de maíz de SWB.	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación bibliográfica de valores de Eficiencia de Uso del Agua (EUA) de trigo.	13
Tabla 2. Recopilación bibliográfica de valores de Eficiencia de Uso del Agua (EUA) de soja.	14
Tabla 3. Recopilación bibliográfica de valores de Eficiencia de Uso del Agua (EUA) de maíz.	15
Tabla 4. Parámetros genéticos de cultivo de maíz utilizados en el análisis de sensibilidad y su rango de variación.	39
Tabla 5. Composición de cultivos, duración, índice de intensidad (IIS), índice de diversidad (ID), proporción de gramíneas (PG) y proporción de maíz (PM) de la secuencia de cultivo. S: soja, M: maíz, T: trigo, T/S: doble cultivo trigo/soja, y T/M: doble cultivo trigo/maíz.	42
Tabla 6. Resumen de datos climáticos medidos en los ensayos experimentales durante la estación de crecimiento de trigo, soja y maíz en Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto en la estación de crecimiento 2007/08.	47
Tabla 7. Propiedades físicas e hidrológicas de los suelos medidas en los sitios experimentales.	48
Tabla 8. Resultados experimentales de suelo y cultivo para trigo, soja y maíz en Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto en la estación de crecimiento 2007/08.	49
Tabla 9. Parámetros de crecimiento, morfología y fenología de trigo, soja y maíz ajustados en la calibración del modelo SWB.	50
Tabla 10. Resumen del análisis estadístico de las simulaciones de acumulación de biomasa, rendimiento de grano, consumo de agua y dinámica del agua en el suelo en trigo, soja y maíz.	56
Tabla 11. Resumen estadístico de la calidad predictiva de SWB para trigo, soja y maíz en distintos puntos geográficos del área de estudio.	64
Tabla 12. Precipitación, déficit de presión de vapor (DPV), consumo de agua, biomasa y rendimiento de granos para los cultivos de trigo, maíz temprano y de segunda, soja de primera y segunda para Laboulaye y Río Cuarto simulados con SWB.	67
Tabla 13. Consumo de agua, rendimiento en grano, y eficiencia de uso del agua (EUA) de trigo, soja de primera, soja de segunda, maíz de primera, y maíz de segunda para Laboulaye y Río Cuarto para las secuencias de cultivos analizadas.	68
Tabla 14. Precipitación anual, consumo de agua y captura de agua para los cultivos de maíz, soja, trigo/soja de segunda, y trigo/maíz de segunda para Laboulaye y Río Cuarto en distintas secuencias de cultivos.	73
Tabla 15. Precipitación, consumo de agua, captación de agua, EUA y PA para las secuencias de cultivos simuladas en Laboulaye y Río Cuarto.	75
Tabla 16. Grado de Ajuste (R_2) de la regresión entre las variables agronómicas y el índice de intensidad (IIS), índice de diversidad (ID), Proporción de Gramíneas (PG) y proporción de Maíz (PM) de las secuencias de cultivo para Laboulaye y Río Cuarto.	76
Tabla 17. Rendimiento en grano y glucosa simulado para diferentes secuencias de cultivos en Laboulaye y Río Cuarto.	77

Tabla 18. Diferencia porcentual del consumo de agua, eficiencia de uso del agua (EUA) y productividad del agua (PA) de las secuencias de cultivos simuladas para Laboulaye y Río Cuarto respecto a la secuencia soja - soja.....	81
Tabla 19. Resumen de estadísticos de parametrización de varios modelos utilizados a nivel mundial.....	121
Tabla 20. Análisis estadístico de la corroboración de la simulación de biomasa de SWB.....	130
Tabla 21. Análisis estadístico de la corroboración de la simulación de rendimiento en grano de SWB.....	130
Tabla 22. Análisis estadístico de la corroboración de la simulación de consumo de agua de SWB.....	131

SIGLAS Y ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado	Unidades
AF	Área foliar	m ²
B _{RFA}	Acumulación de biomasa por radiación	kg m ⁻² día ⁻¹
B _{TR}	Acumulación de biomasa por transpiración	kg m ⁻² día ⁻¹
C _{agua}	Captación de agua	Adim.
CAU	Capacidad de agua útil	mm
CO ₂	Dióxido de carbono	-
CSC	Región Centro - Sur de Córdoba	-
<i>d</i>	Índice de agregación de Willmott	Adim.
D	Desvío estándar	-
D _f	Duración Foliar	Grados días
DPV	Déficit de presión de vapor	kPa
Dx	Déficit de presión de vapor a la hora de la máxima temperatura	Pa
<i>e</i>	Eficiencia de uso de la radiación	g MJ ⁻¹
EP	Evaporación potencial	mm
ET _C	Evapotranspiración del cultivo	mm
ETP	Evapotranspiración potencial	mm
EUA	Eficiencia de uso del agua	g mm ⁻¹
<i>f</i>	Fracción de intercepción de radiación	Adim.
GDD	Grados días	
IAF	Índice de área foliar	m ² m ⁻²
ID	Índice de diversidad	Adim.
IIS	Índice de intensidad	Adim.
<i>k</i>	Coefficiente de extinción solar	Adim.
K	Conductividad hidráulica	kg s ⁻¹ m ⁻³
<i>k_b</i>	Coefficiente transpiración - biomasa	Pa
<i>lsp</i>	Coefficiente de partición hoja - tallo	kg m ⁻²
M	Maíz	-
n	Número de dato	-
e.g.	Por ejemplo	-
PA	Productividad del agua	g mm ⁻¹
PG	Proporción de gramíneas	Adim.
PM	Proporción de maíz	Adim.
P _r	Máxima profundidad de la raíz	m
RFA	Radiación fotosintéticamente activa	MJ m ⁻² día ⁻¹
RFAi	Radiación fotosintéticamente activa interceptada	MJ m ⁻² día ⁻¹
RMSE	Raíz del error medio cuadrático	-
RRMSE	Raíz del error medio cuadrático relativo	%
s	Pendiente de la curva de saturación de presión de vapor en el punto de la temperatura promedio de la T _{max} y T _{min}	-

Abreviatura	Significado	Unidades
S	Soja	-
S_i	Índice de sensibilidad	Adim.
SLA	Área foliar específica	$m^2 kg^{-1}$
SWB	modelo Soil Water Balance	-
t	Tiempo	-
T	Trigo	-
T_{act}	Transpiración actual del cultivo	mm
T_b	Temperatura base	$^{\circ}C$
T_C	Temperatura límite	$^{\circ}C$
Temp	Temperatura media del aire	$^{\circ}C$
T_{max}	Temperatura máxima	$^{\circ}C$
T_{min}	Temperatura mínima	$^{\circ}C$
Top	Temperatura óptima del cultivo	$^{\circ}C$
TP	Transpiración potencial	mm
U_i	Absorción de agua por la raíz	$kg m^{-3} s^{-1}$
V	Varianza	-
X	Valor simulado de Y	-
Y	Variable de independiente	-
z	Espesor de la capa de suelo	m
θ	Contenido hídrico volumétrico	$m^3 m^{-3}$
ρ_w	Densidad del agua	$kg m^{-3}$
Ψ	Potencial hídrico del suelo	$J kg^{-1}$
Ψ_{mi}	Potencial mátrico del suelo	$J kg^{-1}$
Ψ_{xsc}	Potencial hídrico de la hoja a cierre estomático	$J kg^{-1}$
Ψ_{xwilt}	Potencial hídrico de la hoja a marchitez	$J kg^{-1}$

Agricultural systems with a single annual crop, and in some cases monoculture, such as those in the region South-Central of Cordoba - SCC (Argentina), often underutilize usually rainwater available for grain production. In the region SCC took place in several scientific studies to assess the efficiency of water use for traditional crops (maize and soybeans, primarily). However, the degree of utilization of rainwater crop sequences remains unknown. The aim of this thesis was to evaluate, by using a simulation model, the sequences of typical agricultural crops SCC region and determine the best combination of intensification, diversity, and temporal ordering of the sequence of crops in order to achieve the best use of rainwater.

We adapted, calibrated and corroborated simulation model Soil Water Balance (SWB) to simulate crop sequences over a period of 50 years to two environmental conditions in the SCC (Laboulaye and Río Cuarto). Crop sequences include combining simulated crops wheat (W) (*Triticum aestivum* L.), soybean (S) (*Glycine max* [L.] Merr.) and maize (M) (*Zea mays* L.). Sequences simulated crops (S-S, S-M, W/S-M, W/S-S, W/M-M, W/M-S, and W/S) was quantified with the index of intensification (ISS), diversity index (ID), grasses proportion (PG) and maize proportion (PM). The degree of utilization of rainwater for each crop sequence was assessed by the Water Productivity (WP), which is the result of water capture (C_{water}) (water consumption and rainfall relationship during the time period extends the sequence) and the WUE (relationship between grain yield and water consumption of the sequence).

The change in the temporal ordering of soybean and maize crops (i.e. first soybean or second soybean) showed differences in water use, grain yield, and the WUE. Maize was more sensitive than soybean the temporal ordering primarily affecting of water consumption and grain yield. Soybean was shown to be more sensitive to temporal order in Río Cuarto while than maize it was in Laboulaye. The increase in intensification improved use rain water ($> WP$) to an optimum point is increased above an $ISS > 1.5 \text{ yr}^{-1}$ is reduced. In addition, the WP is directly related to the PG and, especially, the PM. Sequences with greater WP in both study sites were W/M-M and W/S-M. The most common sequence of crops in the SCC (S-S) region is the lower C_{water} , WUE and WP showed. In the long term, the sequences have higher WP in the environmental conditions of the region are the SCC including three crops every two years and are a major component of grasses, and especially maize, ($PG \geq 1$ between wheat and maize). How to increase this WP is increasing the intensity of the sequence and the proportion of grasses and maize tending to improve C_{water} and WUE. Finally, it should be noted that current farming systems in the SCC region, which have a high proportion of soybean, have a degree of water utilization very low compared to other sequences of alternative crops. Being the most critical factor the high degree of underutilization of rain ($> 50\%$). The tasks performed in adaptation, parameterization, calibration, and corroboration of SWB provide an input to future research undertaken with simulation models. Additionally, adaptation on SWB allowed to successfully simulated crop sequences.