

Modelo de simulación de sistemas de cultivo SWB-Rot (Soil Water Balance): calibración y validación para la región Pampeana Argentina

Horacio Videla Mensegue¹, Javier Marcos¹, Américo Degioanni² y Elena Bona-deo²

¹ Investigador independiente

² Facultad de Agronomía y Veterinaria - Universidad Nacional de Río Cuarto
hvidelamensegue@gmail.com

RESUMEN.

Los modelos de simulación de cultivos son herramientas que pueden ayudar en el estudio de la dinámica del agua una vez calibrado y validado con datos de campo. Los objetivos de este trabajo fueron: a) adaptar el modelo SWB-Rot y b) calibrar y validar SWB-Rot para trigo, soja y maíz para la región Pampeana Sub-húmeda Argentina. Se realizaron 9 ensayos de trigo, soja y maíz para calibrar y se recopilaron 109 ensayos para la validación. La calibración de SWB-Rot permitió capturar muy bien las variaciones en el crecimiento de biomasa, rendimiento, consumo de agua y contenido hídrico del suelo. La validación permitió corroborar la capacidad de SWB-Rot para simular el crecimiento en biomasa, rendimiento y consumo de agua similares a los logrados para los mejores modelos a nivel mundial. El SWB-Rot puede ser utilizado como una herramienta para analizar la dinámica del agua en la región Pampeana Sub-húmeda Argentina.

PALABRAS CLAVES. Modelación, agricultura, uso del agua.

1 Introducción

Los modelos de simulación de cultivos son herramientas muy útiles para diseñar y explorar opciones de manejo de sistemas productivos en situaciones donde la información experimental está ausente [1–3]. Una vez calibrado y validado con datos de campo, el modelo puede ser usado para extrapolar resultados experimentales obtenidos en pocas localidades y durante un período corto de tiempo a una larga serie de años y a otros lugares [4–6].

Actualmente, el agua es el factor que limita, por déficit o exceso, la productividad de las tierras agrícolas de la región Pampeana Sub-húmeda Argentina [6]. Muchos trabajos utilizaron modelos de simulación para el estudio de la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera y el análisis de la eficiencia de uso de recursos [7–9]. Sin embargo, son escasos los modelos de cultivos desarrollados, calibrados y validados para las condiciones ambientales de la región Pampeana Sub-húmeda.

Uno de ellos es el modelo de simulación SWB (Soil Water Balance) desarrollado [10] y adaptado [11] para los objetivos específicos de este trabajo. El modelo simula la producción de un ciclo de cultivo. Está escrito Visual Basic para Aplicaciones (VBA) para Microsoft Excel®. Esta característica permite a los usuarios configurar fácilmente la estructura de entradas y salidas como así también modificar o adaptar directamente el código para adecuarlo a los objetivos propuestos o a las situaciones a evaluar. En este caso la necesidad fue simular, no solo un ciclo de cultivos sino rotaciones de cultivos. Esta flexibilidad no está tan fácilmente disponible en otros modelos de cultivos utilizados en la región con similares propósitos ya que para modificarlos es necesario un contacto casi cotidiano con los desarrolladores de los mismos. En el caso de los modelos Aquacrop [12] o DSSAT [13] que tienen la limitante que deben ser usados casi tal como son distribuidos.

En el SWB la acumulación potencial de biomasa se estima con un enfoque dual el cual consiste en el mínimo del crecimiento limitado por radiación y por transpiración. Muchos de los modelos de cultivos estiman el crecimiento potencial de biomasa principalmente limitado por radiación el cual luego es disminuido según coeficientes de déficit hídrico [14]. El enfoque dual permite que la acumulación de biomasa se estime más conservativamente en condiciones de moderado a alto déficit de presión de vapor y donde la productividad es limitada mayormente por restricciones hídricas [14, 15]. El SWB fue utilizado para estudiar la producción de maíz de secano en el Noroeste Pacífico de Estados Unidos [10] y cuantificar el balance hídrico en maíces bajo riego en las tierras áridas de Castilla de la Mancha, España [16]. En Argentina, fue utilizado para evaluar el balance hídrico en maíz [17] y para cuantificar el efecto de la capa freática en soja [18].

Los objetivos de este trabajo fueron, por un lado, adaptar el SWB para la simulación de rotaciones dando como resultado SWB-Rot; y por otro, calibrar y validar el modelo de simulación SWB-Rot para los cultivos de trigo, soja y maíz en las condiciones ambientales de la región Pampeana Sub-húmeda Argentina. El modelo adaptado (SWB-Rot), calibrado y validado, fue utilizado como herramienta central en un trabajo de los mismos autores para evaluar la productividad del agua en las tierras agrícolas de dicha región con diferentes alternativas de uso y manejo.

2 Materiales y Métodos

Descripción del modelo

SWB es un modelo de paso diario y simula un solo ciclo de cultivo. Los principales componentes de SWB simulan los procesos de balance hídrico en el sistema suelo – planta – atmósfera, desarrollo del cultivo, crecimiento foliar y radicular, producción de biomasa y rendimiento.

El balance hídrico del suelo estimado por el SWB incluye los procesos de precipitación, riego, escurrimiento, infiltración, aporte de la capa freática, redistribución del agua en el perfil de suelo, percolación profunda, transpiración del cultivo y evaporación. El escurrimiento disminuye la cantidad de agua que ingresa al suelo y la perco-

lación profunda es la pérdida de agua que ocurre por debajo del perfil como resultado de gradientes gravitatorios. El transporte y almacenamiento de agua en todo el sistema suelo-planta-atmósfera es resuelto por métodos numéricos de diferencia finita en un sistema de ecuaciones de flujo entre las diferentes capas de suelo. El perfil de suelo es dividido en nodos, en los cuales se definen 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 Richards. Las ecuaciones de flujos siguen gradientes de potencial agua del suelo y es lo que permite simular tanto flujos de agua descendentes (infiltración) como ascendentes (ascenso freático). Ecuaciones de flujos equivalentes se integran al sistema para resolver la absorción de agua por las raíces y transpiración del cultivo.

La evapotranspiración potencial (ETP) se calcula usando el método de Penman – Monteith [19]. El cálculo de la ETP requiere datos diarios de temperatura máxima y mínima, radiación solar global, 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 [20].

La acumulación de biomasa se calcula como el mínimo del crecimiento limitado por radiación y el crecimiento limitado por agua (método dual). El primero es una función de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por el dosel y un coeficiente de conversión de PAR a biomasa [21]. El crecimiento limitado por agua se determina de acuerdo a la función desarrollada por Tanner y Sinclair [22]. Ambos métodos, tienen parámetros de calibración (e y k_b eficiencia de uso de la radiación y de la transpiración, respectivamente) que se ingresa al modelo como parámetro característico de cada cultivo. Esta función de acumulación de biomasa limitada por transpiración se basa en el hecho de que la transpiración, o pérdida de agua por la hoja, y asimilación de carbono comparten la misma vía (estoma). Si se restringe el aporte de agua a las hojas, disminuye la pérdida de agua por la transpiración y se produce el cierre parcial de los estomas. En consecuencia, se reduce la tasa de absorción de CO_2 y la asimilación de carbono. La biomasa particionada a las partes reproductivas del cultivo determina el rendimiento y depende del coeficiente de partición durante las etapas reproductivas. Una descripción detallada de los componentes del modelo puede ser consultada en [23].

Adaptación del SWB para rotaciones: SWB-Rot

El modelo original para un solo ciclo de cultivo fue adaptado, mediante modificaciones realizadas específicamente para este trabajo, a multi-cultivo y multi-anual (SWB-Rot). De esta forma, el modelo SWB-Rot puede simular rotaciones de cultivos, con diferentes selección de cultivares y opciones de riego y el efecto de la profundidad de la capa freática. Para lograr el funcionamiento multi-cultivo y multi-anual, y la correcta configuración de rotaciones a simular, se amplió la estructura interna de entradas y salidas del modelo original SWB [10]. Para ello, se diseñó una interfase de usuario para el ingreso eficiente de información. El SWB-Rot necesita una mayor

cantidad de datos de inicialización y genera un volumen de datos de salida mayor en comparación al SWB original. Para la configuración es necesario especificar los cultivos y fechas de siembra (día/mes/año) a simular a lo largo de la rotación. Las variables de estado entre simulaciones de varios cultivos son actualizadas de acuerdo a la programación de rotaciones de cultivos. SWB-Rot puede simular rotaciones de cultivos durante 100 años pudiéndose definir fechas de siembras diferentes para cada cultivo en la rotación. Las variables de salida son agrupadas en: climáticas, de suelo, de capa freática, y de cultivo. Cada conjunto de datos de estos grupos está integrado por un gran número de variables que pueden ser activadas para que SWB-Rot las incluya en la salida. También, estas variables pueden ser configuradas para que se reporten diaria o estacionalmente.

Calibración de SWB

Las relaciones funcionales implementadas en SWB-Rot son controladas por parámetros que deben ser calibrados con información de campo antes de aplicar el modelo a situaciones independientes. Para ello, se realizaron tres ensayos de trigo (*Triticum aestivum L.*), soja (*Glycine max L.*) y maíz (*Zea mays L.*) en tres localidades del centro-sur de Córdoba en el año 2007 y 2008. Los ensayos se realizaron en Laboulaye, Olaeta y Río Cuarto. En cada sitio de experimentación se evaluó cada uno de los cultivos registrándose datos de clima, suelo y cultivo. Los datos climáticos registrados diariamente fueron temperatura, radiación solar global, velocidad del viento y precipitación. Los datos de suelo medidos fueron contenido hídrico gravimétrico, textura, densidad aparente, capacidad de campo y marchitez permanente, profundidad y salinidad de la capa freática. En el cultivo se midió la biomasa aérea (en varios momentos del ciclo del cultivo), rendimiento, fecha de emergencia, floración y madurez fisiológica. Para más detalle sobre los ensayos de calibración consultar [11].

A partir de los datos de campo, se calculó el parámetro k_b como la pendiente de la regresión lineal entre la acumulación de biomasa diaria y el cociente entre la transpiración actual y el déficit de presión de vapor (DPV) diario [22]. La transpiración actual del cultivo fue calculada a partir del balance hídrico del perfil de suelo [24]. La e fue calculada como la pendiente de la regresión lineal entre la biomasa acumulada y la radiación fotosintéticamente activa interceptada ($IPAR$) [21]. La $IPAR$ es igual al producto entre PAR y la fracción de intercepción de radiación del cultivo. El resto de los parámetros (área foliar específica, coeficiente de partición hoja-tallo, coeficiente de extinción solar, 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: biomasa aérea, rendimiento, consumo de agua y contenido hídrico del suelo.

Validación del modelo

La validación del modelo fue realizada con 109 ensayos de trigo, soja y maíz realizados en el área de estudio durante el período 2001-2008. En lo posible, las variedades y/o híbridos utilizados en los ensayos de validación fueron las mismas que en los experimentos de calibración. 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 tomada de las 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 que el modelo de balance hídrico del suelo estime dicha condición inicial. Las variables de salida usadas para la validación del modelo fueron la biomasa (en distintos estados de crecimiento), rendimiento y consumo de agua. Esta fue calculada como la suma de los cambios en el contenido hídrico del suelo y la precipitación efectiva durante la estación de crecimiento.

Análisis estadístico

El grado de ajuste de las variables simuladas y observadas fue evaluado por comparación gráfica y por la comparación numérica de la agregación de los datos. El análisis numérico fue realizado por cuatro indicadores estadísticos: raíz del error medio cuadrático (*RMSE*) [25], raíz del error medio cuadrático relativo (*RRMSE*) [26], índice de agregación (*d*) [27], y coeficiente de determinación (R^2) con un $p < 0.05$.

3 Resultados y Discusión

Calibración del modelo

Los parámetros de cultivo ajustados para trigo, soja y maíz son mostrados en la Tabla 1. Los parámetros principales a ajustar son k_b y e dado que son los que más impacto tienen sobre la acumulación de biomasa y el rendimiento [11]. El valor k_b fue 4.48, 4.5 y 7.89 Pa para trigo, soja y maíz respectivamente siendo similar a los informados en la bibliografía [7, 22, 28]. La eficiencia de uso de la radiación (e) fue 1.53, 0.97 y 2.29 gr Mj^{-1} para trigo, soja y maíz respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango informado por varios trabajos a nivel mundial para los tres cultivos [29, 30]. El resto de los parámetros mostrados en la Tabla 1 se encuentran dentro del rango informado en la bibliografía. Para más detalles sobre la parametrización se sugiere consultar [11].

Los resultados de la calibración de la acumulación de biomasa, rendimiento, consumo de agua y contenido hídrico del suelo se muestran en la Fig. 1. El grado de ajuste del modelo para la simulación de biomasa de trigo fue $d = 0.95$ y $RRMSE = 7.52\%$ (Tabla 2). En general, la agregación de los datos muestra que SWB-Rot captura las variaciones en la generación de biomasa. Al respecto, las calibraciones realizadas para CropSyst obtuvieron un $d = 0.98$ y 0.94 y un $RRMSE$ de 10.8 y 13% [31] y [32], respectivamente. El menor valor de d obtenido en este estudio puede ser debido a un menor ajuste en la simulación del crecimiento del cultivo en la etapa inicial del ciclo, tendiendo a una sobreestimación de la producción de biomasa (Fig. 1.a). El ajuste de las simulaciones para soja muestran un $d = 0.98$ y $RRMSE = 9.11\%$. Este valor es aproximadamente 40% más bajo que lo reportado para CROPGRO ($RRMSE$

= 16%), en simulaciones realizadas para varias localidades de Argentina [33]. El valor de *RRMSE* obtenido para maíz es 35% inferior a los valores reportados para CropSyst [7, 8] y AquaCrop [34]. Finalmente, el valor *d* obtenido en este estudio fue similar al hallados en la bibliografía ($d = 0.92$, $p < 0.05$) para la simulación de biomasa para varios modelos de cultivo y lugares del mundo [7, 34].

Tabla 1. Parámetros de crecimiento, morfología y fenología de trigo, soja y maíz ajustados para SWB-Rot en las condiciones ambientales de la región Pampeana Sub-húmeda Argentina.

Parámetros	Trigo	Soja	Maíz
Crecimiento			
Coefficiente transpiración-biomasa (k_b - $\text{kPa kg}^{-1} \text{m}^{-3}$) [*]	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 (<i>SLA</i> - $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) ^{**}	20	30	30
Coefficiente de partición hoja-tallo (<i>lsp</i> - kg m^{-2}) ^{**}	3,3	3	2
Duración foliar - (grados días) ^{**}	750	1200	1000
Coefficiente de extinción solar (<i>k</i>) ^{**}	0,55	0,4	0,5
Fenología			
Temperatura base (T_b - $^{\circ}\text{C}$) [*]	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.

La Fig. 1.b muestra el ajuste de los valores observados y simulados de rendimiento para trigo, soja y maíz. El valor de *RRMSE* logrado fue 7.27% mientras que *d* fue 0.96. El *RRMSE* conseguido para trigo fue mucho menor (> 70%) a los hallados en la bibliografía [35, 36]. El valor de *d* obtenido para soja es 10% superior que los hallados en la bibliografía para los modelos CROPGRO [37, 38] y CropSyst [7]. Sin embargo, el *RRMSE* de maíz fue 10% superior a los valores mencionados para CropSyst [8, 39].

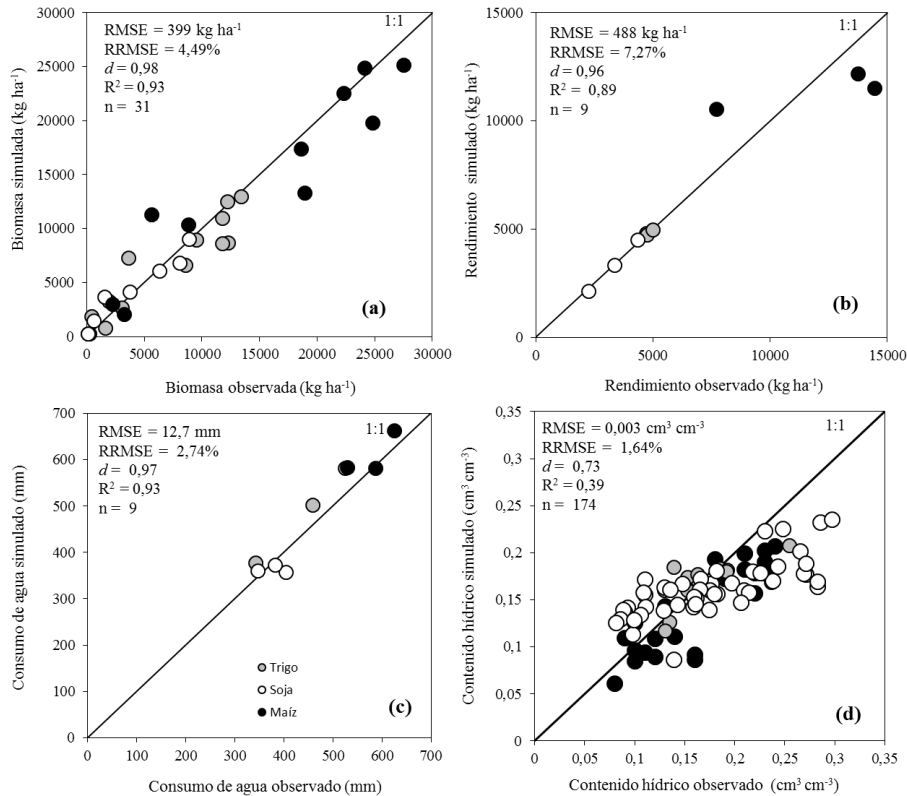


Fig. 1. Valores simulados y observados de biomasa durante el ciclo de los cultivos (a), rendimiento (b), consumo de agua (c), y contenido hídrico del suelo (d) para trigo, soja y maíz. Referencia: círculo gris: trigo; círculo blanco: soja; y círculo negro: maíz. Coeficiente de determinación (R^2) para la línea 1:1 con un $p < 0.05$.

El consumo de agua simulado y observado para trigo, soja y maíz muestra un muy buen ajuste en comparación a los valores reportados en la bibliografía (Fig. 1.c). El *RRMSE* obtenido para trigo fue 14% superior a los valores mencionados para los modelos APSIM [40] y 45% menor a los informados para CropSyst [32, 41] mientras que d fue similar a los mencionados para estos modelos (0.91). Los valores de *RRMSE* para soja y maíz son mejores (51 y 29%, respectivamente) a los mencionados en algunos trabajos científicos [7, 8]. Sin embargo, d fue menor para los mismos trabajos (45 y 24%, respectivamente).

La simulación del contenido hídrico del suelo para trigo mostró mejor ajuste (*RRMSE* = 1.77%) en comparación a los restantes cultivos. En soja y maíz la magnitud del *RRMSE* fue 54 y 51% mayor que para trigo, respectivamente. No obstante, la simulación del contenido hídrico de maíz tiene una mejor agregación ($d = 0.92$) en comparación a los restantes cultivos. En trigo, se lograron mejores ajustes de la simulación del contenido hídrico del suelo al alcanzado en este estudio (*RMSE* = 0.002

cm³ cm⁻³) [42]. Sin embargo, el ajuste de la simulación del contenido hídrico para trigo de SWB-Rot fue mejor comparado con los restantes trabajos analizados [35, 43, 44].

Tabla 2. Resumen estadístico de la calibración de SWB-Rot para biomasa, rendimiento, consumo de agua y contenido hídrico del suelo para los cultivos de trigo, soja y maíz. Coeficiente de determinación (R^2) para la línea 1:1 con un $p < 0.05$.

Variable	Cultivo	n	Promedio de observados	Promedio de estimados	RMSE	RRMSE (%)	d (adim.)	R^2
Biomasa (kg ha ⁻¹)	Trigo	12	7509	7111	564,9	7,52%	0,95	0,85
	Soja	9	3283	3571	299	9,11%	0,98	0,94
	Maíz	10	15611	14990	1001	6,41%	0,96	0,89
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Trigo	3	4820	4850	36,97	0,77%	0,99	0,82
	Soja	3	3323	3326	59,7	1,80%	0,99	0,99
	Maíz	3	11976	11413	1461	12,21%	0,99	0,74
Consumo de agua (mm)	Trigo	3	441,9	487,2	26,6	6,03%	0,92	0,99
	Soja	3	377,2	364,2	16,3	4,32%	0,53	0,72
	Maíz	3	579,8	609,2	22,2	3,83%	0,74	0,63
Contenido hídrico (cm ³ cm ⁻³)	Trigo	102	0,17	0,16	0,003	1,77%	0,58	0,50
	Soja	48	0,18	0,161	0,007	3,97%	0,71	0,55
	Maíz	24	0,15	0,14	0,006	3,64%	0,91	0,73

En resumen, el ajuste de los parámetros de cultivos obtenido permite capturar las variaciones en el crecimiento de biomasa, rendimiento, consumo de agua y contenido hídrico del suelo para trigo, soja y maíz en las condiciones ambientales de la región Pampeana Sub-húmeda Argentina. El error en la simulación de rendimiento es 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. Sin embargo, el ajuste del contenido hídrico del suelo simulado fue levemente inferior a los logrados para otros modelos. Para las condiciones ambientales de la región Pampeana Sub-húmeda Argentina, lograr adaptar y ajustar un modelo de simulación con una muy buena predictibilidad del consumo de agua y el rendimiento del cultivo aporta una herramienta valiosa para el estudio de la productividad del agua.

Validación del modelo

La Tabla 3 muestra un resumen del análisis estadístico de la validación de SWB-Rot para la acumulación de biomasa, rendimiento y consumo de agua. El *RRMSE* de la acumulación de biomasa fue 13.59 y 5.64% para soja y maíz, respectivamente. Estos valores son 15 y 26% inferiores a los mostrados en la bibliografía para CROPGRO [13] y CropSyst [8]. Los ajustes para la simulación de maíz con AquaCrop reportaron un *RRMSE* de 11.3% [45]. Estas magnitudes de error de predicción publicadas para ambos modelos son similares a las logradas en este estudio. En cuanto al valor d fueron similares a los informados para CropSyst (0.95) e igual al de AquaCrop (0.97).

Tabla 3. Resumen estadístico de la validación de SWB-Rot para biomasa, rendimiento y consumo de agua para los cultivos de trigo, soja y maíz en las condiciones ambientales de la región pampeana sub-húmeda. Coeficiente de determinación (R^2) para la línea 1:1 con un $p < 0.05$.

Variables	Cultivo	n	Promedio de observados	Promedio de estimados	RMSE	RRMSE	d	R^2
						(%)	(adim.)	
Biomasa (kg ha^{-1})	Soja	12	5202	5429	707	13,59	0,93	0,85
	Maíz	18	10192	9808	575	5,64	0,97	0,92
	Trigo	40	3705	3762	74,56	2,01	0,95	0,86
Rendimiento (kg ha^{-1})	Soja	32	3787	3643	63,12	1,67	0,96	0,88
	Maíz	37	11397	11382	104,7	0,92	0,95	0,84
Consumo de Agua (mm)	Maíz	18	435,3	414,6	12,15	4,81	0,97	0,92

En general, la calidad predictiva del modelo para el rendimiento es muy buena ($RRMSE = 3.5\%$) comparado con los resultados informados en la literatura ($RRMSE = 16\%$). SWB-Rot predijo de forma similar el rendimiento de los tres cultivos ($p < 0.05$). 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 ($p < 0.05$, datos no mostrados).

La capacidad predictiva del consumo de agua para maíz fue similar a la obtenida por otros modelos de simulación con el mismo cultivo (Tabla 3). El $RRMSE$ 4.81% es inferior (15%) al error reportado en algunos trabajos con CropSyst [8]. Sin embargo, resulta 27% superior al error publicado para RZWQM [46]. En síntesis, la capacidad predictiva global de SWB-Rot fue 82.1%. La predictibilidad de la acumulación de biomasa fue similar o mejor a las reportadas para otros modelos de simulación. El grado de error para la predicción del rendimiento fue 3.5%, siendo similar para trigo, soja y maíz. Mientras que el consumo de agua del cultivo fue similar a lo informado en la bibliografía.

4 Conclusión

En este trabajo se adaptó, calibró y validó el modelo de simulación de cultivos SWB-Rot para trigo, soja y maíz en las condiciones ambientales de la región Pampeana Subhúmeda Argentina. La calibración lograda permitió capturar correctamente las variaciones en la acumulación de biomasa, rendimiento, consumo de agua y contenido hídrico del suelo. La validación de la acumulación de biomasa, rendimiento y consumo de agua fue similar o mejor que las reportadas en la bibliografía para otros modelos de simulación. La performance mostrada por SWB-Rot para la simulación de trigo, soja y maíz permite tener confianza para su utilización en el análisis de los sistemas productivos de la región Pampeana Sub-húmeda Argentina. Especialmente, es relevante la aplicación de SWB-Rot para el estudio de la dinámica del agua en la región y el análisis de prácticas de uso y manejo para mejorar la eficiencia de uso del recurso.

5 Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la Asociación Argentina de Consorcios de Rurales de Experimentación Agrícola (AACREA) y a la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto por la financiación de este trabajo.

6 Referencias

1. Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B.: Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88, 704–716 (1996).
2. Sinclair, T.R., Seligman, N.: Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron. J.* 88, 697–704 (1996).
3. Stockle, C.O., Campbell, G.S., Long, G.: Systems in integrated crop management. Washington State University, Pullman, USA (1996).
4. Monteith, J.L.: The quest for balance in crop modeling. *Agron. J.* 88, 695–697 (1996).
5. Stockle, C.O.: GIS and simulation technologies for assessing cropping systems management in dry environments. *Am. J. Altern. Agric.* 11, 115–120 (1996).
6. Sinclair, T.R.R., Salado Navarro, L.R., Salas, G., Purcell, L.C.C., Salado-Navarro, L.R.: Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agric. Syst.* 94, 471–477 (2007).
7. Stockle, C.O., Cabelguenne, M., Debaeke, P.: Comparison of CropSyst performance for water management in southwestern France using submodels of different levels of complexity. *Eur. J. Agron.* 7, 89–98 (1997).
8. Ferrer-Alegre, F., Stockle, C.O.O., Ferrer, F., Stockle, C.O.O.: A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.* 19, 15–23 (1999).
9. Bellocchi, G., Silvestri, N., Mazzoncini, M., Menini, S.: Using the CropSyst Model in Continuous Rainfed Maize (*Zea mais L.*). 43–56 (2002).
10. Marcos, J.: Corn production under dryland conditions in eastern Washington, Master's Thesis WSU, USA (1997).
11. Videla Mensegue, H.: Uso del agua en secuencias de cultivos agrícolas del centro - sur de Córdoba (Argentina), Tesis de Magister, UNRC (2014).
12. Cisneros, J.M., Scilingo, M., Giayetto, O., Morla, F., Jobbágy, E.G.: Uso del modelo de simulación AquaCrop-FAO para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. In: *En Actas del XXIV Congreso Nacional del Agua*. pp. 1–10. , San Juan, Argentina (2013).
13. Mercou, J.L.L., Dardanelli, J.L.L., Collino, D.J., Andriani, J.M., Irigoyen, a. I., Satorre, E.H.: Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *F. Crop. Res.* 100, 200–209 (2007).
14. Stockle, C.O., Kemanian, A.R.: Driving crop growth model: radiation -versus transpiration - use efficiency. In: Fischer, T. (ed.) *New directions for a diverse planet: Proceedings for the 4th International Crop Science Congress.* , Brisbane, Australia (2004).

15. Videla Mensegue, H., Marcos, J., Espósito, G.P., Degioanni, A.: Comparación de dos modelos de acumulación potencial de biomasa en ambientes subhúmedos del centro de Argentina. In: Workshop Internacional: Eco Fisiología Vegetal Aplicada al Estudio de la Determinación del Rendimiento y la Calidad de los Cultivos de Grano. pp. 2–4. , Mar del Plata, Argentina (2007).
16. Espósito Goya, G., Valiente Gómez, M., Calera Belmonte, C., Castillo, C., Balboa, G., Videla Mensegue, H.: Siembra directa y eficiencia en el uso de agua de riego en maíz. In: XXIX Congreso Nacional de Riegos Córdoba (España) (2011).
17. Espósito, G.P.: Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranzas en cultivo de maíz (2000).
18. Videla Mensegue, H.: Producción de soja en suelos con capa freática somera (2006).
19. Allen, R.G.: Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *J. Hydrol.* 229, 27–41 (2000).
20. Campbell, G.S.: *Soil physics with basic: Transport models for soil-plant systems.* Elsevier Science Publishing Company, New York, USA (1985).
21. Monteith, J.L.: Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. London. B* 281 (1977).
22. Tanner, C.B., Sinclair, T.R.: Efficient water use in crop production: research or re-search. In: Waylor, H.M., Jordan, W.R., and Sinclair, T.R. (eds.) *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.* pp. 1–27. ASA Madison, WI, Madison, Wisconsin (1983).
23. Marcos, J., Campbell, G.G.S.: SWBModel 11. Modelo de simulación de balance hídrico del suelo y crecimiento de cultivos. Río Cuarto, Argentina (2002).
24. Kemanian, A.R., Stockle, C.O., Huggins, D.R.: Transpiration-use efficiency of barley. *Agric. For. Meteorol.* 130, 1–11 (2005).
25. Kobayashi, K., Salam, M.U.: Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92, 345–352 (2000).
26. Wallach, D.: Evaluating crop model. In: Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (eds.) *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications.* ELSEVIER, Amsterdam, The Netherlands (2006).
27. Willmott, C.J.: Some comments on the evaluation model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63, 1309–1313 (1982).
28. Siddique, K.H.M., Tennant, D., Perry, M.W., Belford, R.K.: Water use and water use efficiency of old and modern cultivars in a Mediterranean-type environment. *Aus. J. Agric. Res.* 41, 431–447 (1990).
29. Caviglia, O., Sadras, V., Andrade, F.: Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. *F. Crop. Res.* 87, 117–129 (2004).
30. Otegui, E., Nicolini, M.G., Ruiz, R.A., Dodds, P.A.: Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron J.* 87, 29–33 (1995).

31. Stockle, C.O., Martin, S., Campbell, G.S.: CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46, 335–359 (1994).
32. Pala, M., Stockle, C., Harris, C.: 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 (1996).
33. Kantolic, A.G., Mercau, J.L., Slafer, G.A., Sadras, V.O.: Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. *F. Crop. Res.* 101, 321–330 (2007).
34. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E.: Users guide AquaCrop. (2009).
35. Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellensa, J., Sahli, A., Wellens, J.: Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agric. Water Manag.* 81, 335–357 (2006).
36. Monzón, J.P., Sadras, V.O., Abbate, P.A., Caviglia, O.P.: Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *F. Crop. Res.* 101, 44–52 (2007).
37. Irmak, A., Jones, J.W., Mavromatis, T., Welch, S.M., Boote, K.J., Wilkerson, G.G.: Evaluating Methods for Simulating Soybean Cultivar Responses Using Cross Validation. *Agron J.* 92, 1140–1149 (2000).
38. Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Wilkerson, G.G., Hoogenboom, G.: Repeatability of Model Genetic Coefficients Derived from Soybean Performance Trials across Different States. *Crop Sci.* 42, 76–89 (2002).
39. Ferrer, F., Villar, J.M., Stockle, C.O.: Evaluación del modelo de simulación CropSyst para maíz de regadío en el valle del Ebro. *Invest. Agr. Prot. Veg.* 15, 237–251 (2000).
40. Moeller, C., Pala, M., Manschadi, A.M., Meinke, H., Sauerborn, J.: Assessing the sustainability of wheat-based cropping systems using APSIM: model parameterisation and evaluation. *Aust. J. Agric. Res.* 58, 75–86 (2007).
41. Pankuk, C.D., Stockle, C.O., Papendick, R.I.: Evaluating CropSyst simulations of wheat management in a wheat - fallow region of the US Pacific Northwest. *Agric. Syst.* 57, (1998).
42. Sadras, V., Baldock, J., Roget, D., Rodriguez, D.: Measuring and modelling yield and water budget components of wheat crops in coarse-textured soils with chemical constraints. *F. Crop. Res.* 84, 241–260 (2003).
43. Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J., Pereira, L.S.: Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China plain. *Agric. Water Manag.* 36, 233–246 (1998).
44. Singh, R., van Dam, J.C., Feddes, R.A.: Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agric. Water Manag.* 82, 253–278 (2006).
45. Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E.: AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agron J.* 101, 448–459 (2009).
46. Cameira, M.R.R., Fernando, R.M.M., Ahuja, L., Pereira, L.: Simulating the fate of water in field soil–crop environment. *J. Hydrol.* 315, 1–24 (2005).