



“Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO
XXIII CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO

Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012
contribuciones@congresodesuelos.org.ar

CALIBRACION Y VALIDACION DEL MODELO AQUACROP DE FAO EN CULTIVOS REPRESENTATIVOS DEL CENTRO SUR DE CORDOBA

Morla, F.D.^{1,2,*}; Giayetto, O.¹

¹ Cultivos Oleaginosos, Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. ² CONICET MCyT Córdoba.

* Autor de contacto: fmorla@ayv.unrc.edu.ar; FAV-UNRC RN 36 KM 601. Río Cuarto Córdoba; 0358-4676159

RESUMEN

La predicción del rendimiento de los cultivos ha sido un objetivo prioritario, tanto con el fin de aumentar el conocimiento de las relaciones clima-suelo-cultivo, como para generar información que se pueda aprovechar en la planificación y manejo de la producción agropecuaria. AquaCrop es un modelo de simulación diseñado para el análisis de la productividad de diferentes cultivos en respuesta al agua disponible. El modelo realiza un balance de agua en el suelo y evalúa impactos del estrés hídrico sobre la producción. El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo utilizando trigo, maíz y soja como cultivos de referencia para la región de Río Cuarto. Los datos se obtuvieron de diferentes ensayos e investigaciones llevadas a cabo en el Campo experimental de la UNRC. La calibración fue realizada modificando algunos coeficientes del modelo referidos a los cultivos y según prácticas de manejo más adoptadas. La validación fue verificada usando los métodos del coeficiente de determinación del ajuste lineal, la pendiente en 1:1 y la raíz del error cuadrático medio (RECM). Los resultados demuestran que las simulaciones realizadas por el modelo presentan un nivel de ajuste aceptable para la escala de trabajo con errores de 5, 13 y 11% para maíz, trigo y soja, respectivamente. AquaCrop presenta sensibilidad a parámetros hidrológicos como la cantidad de precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo, a la cantidad de agua transpirada y al contenido hídrico del perfil del suelo a la siembra. Estos resultados soportan el uso del modelo en la práctica.

PALABRAS CLAVE

modelos de simulación; productividad del agua; balance de agua en el suelo

INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación pueden ser definidos como aproximaciones teóricas a los procesos dinámicos naturales que ocurren en el ecosistema (Leffelaar, 1993). Los modelos de simulación de la dinámica orgánica, validados y parametrizados bajo condiciones locales, constituyen herramientas de gran valor para el monitoreo de la sustentabilidad de los agrosistemas y para el planteo de escenarios alternativos en el diseño de sistemas productivos sustentables (Van Keulen, 1975).

AquaCrop es un modelo desarrollado por FAO que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos herbáceos como una función del consumo de agua bajo condiciones de secano o riego, suplementario o total (Steduto *et al.*, 2009), siendo posible su aplicación para un amplio rango de condiciones ecológicas y sistemas productivos. Este modelo integra el efecto de las variables edáficas y climáticas, junto con las variables de manejo, para simular la producción de los cultivos en respuesta al agua en el sistema suelo-planta. El modelo trabaja con un paso temporal diario y requiere relativamente pocos datos, sencillos y, normalmente, disponibles o posibles de ser estimados a partir de la literatura existente (Heng *et al.*, 2009; Todorovic *et al.*, 2009). Algoritmos y

procedimientos de cálculo modelan la infiltración del agua, el drenaje fuera de la zona radicular, el desarrollo del canopeo y de la zona de raíces, la evaporación y la tasa de transpiración, dando como resultados un balance de agua del suelo, la producción de biomasa y la formación del rendimiento de los cultivos. La transpiración es traducida a biomasa mediante la productividad del agua normalizada por la demanda evaporativa atmosférica y la concentración de dióxido de carbono del aire, específicos del cultivo a simular (Raes *et al.*, 2009). El modelo posee parámetros denominados conservativos, ya prefijados, como productividad del agua normalizada (WP*), coeficientes de cobertura del canopeo (CDC), coeficientes del cultivo (Kc) índice de cosecha de referencia (Hlo), presumiblemente aplicables a diferentes condiciones; y parámetros no específicos, que pueden ser modificados según el genotipo y el manejo a utilizar (Hsiao *et al.*, 2009).

Entre las principales variables que afectan el crecimiento y rendimiento final de los cultivos se destacan la radiación solar, la temperatura, el estado nutricional y la humedad del suelo. Sin embargo, en la región del estudio, durante la estación de crecimiento de los cultivos anuales, es la humedad del suelo la variable más relevante y, por lo tanto, la limitante más importante en la determinación del rendimiento para la mayoría de los años (Andriani *et al.* 1991; Dale *et al.* 1995). En este contexto, AquaCrop se presenta como una herramienta con potencialidades para este uso.

El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo Aquacrop de FAO utilizando trigo, maíz y soja como cultivos de referencia en la región de Río Cuarto (centro-sur de la provincia de Córdoba, Argentina).

MATERIALES Y MÉTODOS

Calibración. Metodología y Fuentes de información

El modelo se calibró con datos empíricos provenientes del campo de Docencia y Experimentación de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), ubicado a 33° 07' latitud Sur, 64° 14' longitud W y a 421 m.s.n.m., sobre un suelo Hapludol típico de textura franca arenosa fina (Bricchi, 1996).

Las variables meteorológicas requeridas por el modelo fueron obtenidas a partir de los registros de la estación agrometeorológica ubicada en el mismo campo experimental.

La elección de los cultivos usados para la calibración del modelo se basó en que más del 85% de la superficie cultivada en la región de Río Cuarto, se destina a la producción de soja y maíz, con una relación aproximada de 2:1 entre ambos cultivos; mientras que el trigo ocupa un 10% de la superficie (Cisneros *et al.*, 2008).

Los datos de suelo fueron obtenidos de trabajos de investigación y relevamientos de suelos realizados en la Universidad Nacional de Río Cuarto (Bricchi, 1996; Cantero *et al.* 1987; Degioanni 1998).

Los parámetros relativos a los cultivos fueron corregidos según datos de investigaciones realizadas a nivel local y regional (Castillo *et al.*, 2007; Cholaky *et al.*, 1986; Pergolini *et al.*, 2004).

Las corridas del modelo fueron realizadas sobre suelos con un porcentaje de cobertura del 90% y en siembra directa. Esta técnica es la más difundida en la región ya que el 93% de la superficie agrícola en operación se cultiva con ese sistema (soja 94.5%, maíz 89,0% y trigo 98,0%) (Cisneros *et al.*, 2008).

Validación

La validación del modelo se realizó con datos provenientes de fuentes independientes de aquellas empleadas previamente para la calibración. El grado de ajuste entre los resultados de las simulaciones y los valores observados, fue caracterizado mediante un modelo lineal y la bondad de ese ajuste se valoró con tres métodos: el coeficiente de determinación (R^2); la pendiente de su

regresión; la raíz del error cuadrático medio (RECM) (Wilmott, 1982) y la validación empírica propuesta por Mitchell (1997).

Análisis de sensibilidad

En el presente estudio, donde se pone especial énfasis en la validación regional del modelo para su posterior aplicación al análisis de diferentes escenarios, se realizó un análisis de la sensibilidad del valor predictivo de las simulaciones frente a variaciones climáticas, edáficas y de manejo.

Se estudiaron los cambios (relativos) operados en diferentes etapas clave del modelo al utilizar diferentes variables de sitio (combinaciones de suelo y clima) de mayor o menor similitud entre sí, intentando representar diferentes grados de variabilidad ambiental. De esta forma, se analizaron las variaciones en la producción de los cultivos y en el comportamiento del agua en el suelo.

A fin de mejorar la interpretación de las simulaciones de AQUACROP, es importante conocer la lógica que respalda a las operaciones del modelo, evitando utilizar una herramienta que revista el carácter de “caja negra”. En tal sentido, se seleccionaron algunos aspectos de la estructura interna del modelo para un análisis más profundo intentando sintetizar e ilustrar la mayor cantidad posible de procesos mecanísticos, considerando así los procesos más importantes de este modelo: (i) la variación de las lluvias, en diferentes años y fechas de siembra; (ii) la transpiración del cultivo, haciendo correr el modelo para diferentes años siempre en la fecha de siembra considera óptima para los cultivos simulados; y (iii) la variación del contenido de agua en el suelo a la siembra en diferentes años.

Aplicación del modelo

Con el modelo calibrado y validado para los tres cultivos se realizaron las corridas de aplicación del mismo. Para esto se seleccionaron años secos, normales y húmedos de una serie de 19 años (de 1990 a 2008) y se simuló, en primer lugar, una producción potencial, máximo rendimiento posible sin ningún tipo de limitación salvo la genética vegetal, la radiación solar y la temperatura. Esta producción teórica sería posible de alcanzar sin limitaciones de agua y de nutrientes, sin daños por malezas, plagas y enfermedades y con el 100% de eficiencia en la recolección del producto cosechable (Degioanni, 1998). Luego, se simuló la producción ajustada a la disponibilidad hídrica durante el ciclo del cultivo para cada una de las categorías de año antes mencionadas.

Por último, se realizaron comparaciones entre los rendimientos simulados por el modelo y los rendimientos obtenidos en ensayos experimentales y producciones a campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación

Tal como se ilustra en la Figura 1, el modelo predijo el rendimiento de los cultivos en forma aceptable para un amplio rango de condiciones agroecológicas con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,91 ($p < 0,01$); 0,81 ($p < 0,05$) y 0,77 ($p < 0,01$) para maíz, soja y trigo, respectivamente. Sin embargo, el modelo subestimó los rendimientos máximos de trigo y maíz y los rendimientos mínimos de soja, y sobreestimó los rendimientos opuestos.

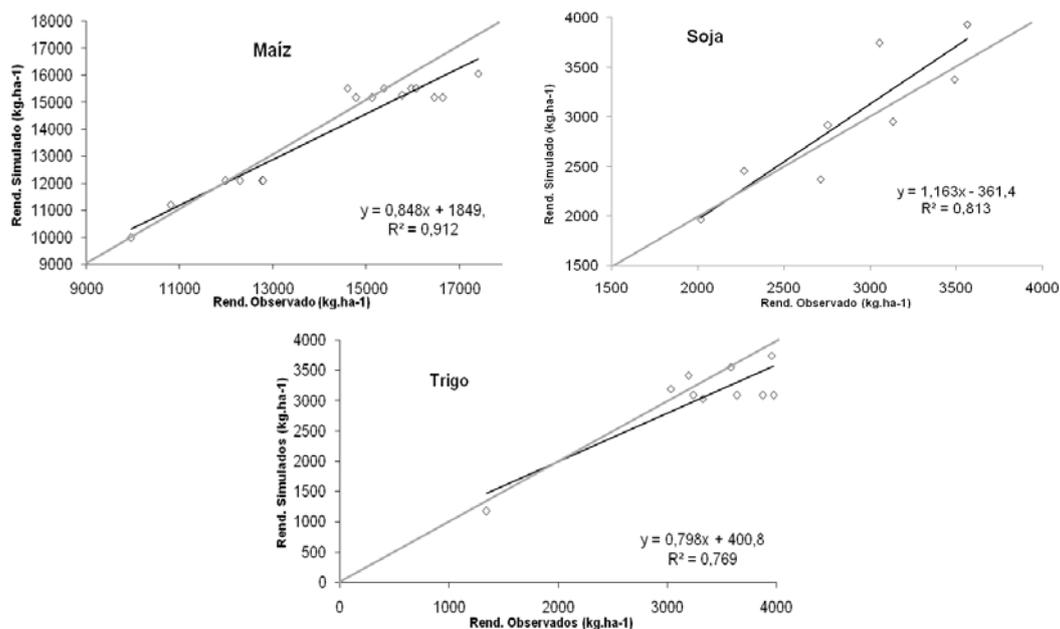


Figura 1. Relación entre rendimientos observados y simulados para el cultivo de maíz, soja y trigo. Línea gris 1:1.

Por otra parte, según los valores de la raíz del error cuadrático medio (RECM), indicados en la Tabla 1, las diferencias entre valores observados y simulados variaron entre 330 (para soja) y 728 Kg.ha⁻¹ (para maíz), lo que representa, en términos porcentuales promedio para todos los cultivos, un 9,86 %.

Tabla 1. Comparación entre producción observada y simulada.

| | Prod. Observada (Kg.ha ⁻¹) | δ (Kg.ha ⁻¹) | Prod. Simulada (Kg.ha ⁻¹) | D (%) | R.E.C.M. (Kg.ha ⁻¹) |
|-------|---|------------------------------------|--|-------|------------------------------------|
| Maíz | 14249 | 2664 | 14137 | 5,09 | 728 |
| Soja | 2939 | 628 | 3056 | 11,19 | 330 |
| Trigo | 3329 | 868 | 3034 | 13,32 | 442 |

Desvío estándar de la producción observada (δ), porcentaje de la RECM en relación con la producción observada (D) y raíz cuadrada del error cuadrático medio (REMC).

Por último, el método propuesto por Mitchell (1996) indicó que en el 97% de los casos (solo 1 de los 34 casos resultó fuera del intervalo de confianza) los valores simulados por el modelo se ajustaron, con un margen de error del 20%, a los datos empíricos.

El modelo mostró sensibilidad a las variables evaluadas en este análisis, siendo mayor la respuesta al agua transpirada por el cultivo, donde en promedio, por cada valor porcentual de cambio de esa variable, el rendimiento varió un 2,76%; mientras que, el contenido hídrico del suelo a la siembra y las precipitaciones ocurridas durante el ciclo de los cultivos mostró un cambio de 1,9 y 0,34% por cada punto porcentual de cambio en la respectiva variable de entrada del modelo.

Aplicación

Los resultados para los cultivos y condiciones seleccionadas se exponen en la tabla 2.

Tabla 2. Rendimientos potenciales y limitados por agua, en años seco, normal y húmedo simulados con AQUACROP, rendimientos experimentales máximos obtenidos a nivel local y rendimientos a nivel de productores promedio para los mismos años.

| Cultivo | Producción Potencial Simulada (kg.ha ⁻¹) | Producción Experimental Máxima (kg.ha ⁻¹) | Fuente | Año | Producción Simulada (kg.ha ⁻¹) | Producción Real a nivel de productores (kg.ha ⁻¹) |
|---------|--|---|------------------------|--------|--|---|
| MAÍZ | 19701 | 19416 | Castillo et al., 2007 | seco | 4549 | 3600 |
| | | | | normal | 8057 | 4700 |
| | | | | húmedo | 11822 | 5530 |
| SOJA | 8321 | 10590 | Cholaky et al., 1986 | seco | 1907 | 1600 |
| | | | | normal | 3173 | 2860 |
| | | | | húmedo | 5364 | 3220 |
| TRIGO | 7084 | 4959 | Pergolini et al., 2004 | seco | 802 | 850 |
| | | | | normal | 1873 | 2000 |
| | | | | húmedo | 3862 | 2850 |

En concordancia con lo descrito por Degioanni (1998), las comparaciones entre los rendimientos potenciales simulados por el modelo y los rendimientos alcanzados en ensayos indicaron, en primer lugar, que es posible lograr los niveles de producción reales próximos al potencial teórico estimado y, en segundo lugar, que estos valores de producción potencial pueden considerarse como referentes de la capacidad productiva de los ambientes de la región.

En el caso de los datos de producción a nivel de productores, estos difieren de los simulados debido, probablemente, a la alta variabilidad en el origen de los datos empíricos, sumado a factores que el modelo no considera como el nivel de fertilidad de los suelos, la presencia de malezas e insectos y la ocurrencia de enfermedades. En todo caso, tal como lo destacan De la Casa y Ovando (2007), este nivel de producción simulado puede resultar útil como guía orientativa en las prácticas de manejo de los cultivos.

CONCLUSIÓN

Los resultados demostraron que las simulaciones realizadas por el modelo presentan un nivel de ajuste aceptable a los valores observados para la escala con la que se trabajó, presentando sensibilidad a los parámetros hidrológicos evaluados. Estos resultados soportan el uso del modelo en la práctica. Además, la simplicidad, robustez y habilidad del modelo para describir el efecto de un estrés ocurrido en momentos particulares del ciclo de los cultivos, hacen que se posicione como una herramienta de gran utilidad para su uso en la determinación de prácticas de manejo como puede ser la elección de fechas de siembra óptimas, de genotipos de diferentes longitud de ciclo y en el desarrollo de estrategias de riego. AquaCrop es un software de formato amigable y de dominio público que puede ser descargado junto a la guía de usuario y ejercicios prácticos de <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto *Bases ambientales para el ordenamiento territorial del espacio rural de la provincia de Córdoba* (BID-PID 13/2009) cofinanciado entre FonCyT y MinCyt-Córdoba.

BIBLIOGRAFÍA

Andriani J.M. F.H. Andrade, E.E. Suero & J.L. Dardanelli, 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie*, 11:737–746.

- Bricchi, E. 1996. Relación entre la compactación, morfología y propiedades físicas de un Hapludol típico de Río Cuarto. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Cantero, A., Bricchi, E., Bonadeo, E. & R. Gallardo. 1987. Propiedades físicas de los principales subgrupos de suelos del centro suroeste de Córdoba II J. Científico-Técnicas FAV Acta, pag. 146.
- Castillo C., Espósito G. & R. Balboa. 2006. Definición del rendimiento potencial de maíz en la región de Río Cuarto (Córdoba, Argentina). Informe Técnico.
- Cholaky L., Cantero A., Giayetto O., Bonadeo E. & E. C. Neuman. 1986. Fertilización nitrogenada y modelos de siembra en soja de hábito determinado: efectos sobre la ontogénesis, nodulación, concentración de nitrógeno, acumulación y distribución de la materia seca, morfología, componentes del rendimiento, rendimiento biológico y económico, índices de cosecha y balance relativo de nitrógeno. Revista UNRC 6(2):133 – 166.
- Cisneros, J. M., Cantero A., Degioanni A., Becerra V. H. & M. A. Zubrzycki. 2008. Capítulo III. Producción, uso y manejo de las tierras. En Percepción económica, visión y actitud de los productores frente a problemas ambientales en el medio rural, Córdoba, Argentina. de Prada J. y J. Penna (editores), Buenos Aires: INTA. pp 31-46.
- Dale, R. F. 1995. A weather-soil variable for estimating soil moisture stress and corn yield probabilities. Agron. J. 87:1115-1125.
- de la Casa, A. & G. Ovando. 2007. Integración del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) y del ciclo fenológico de maíz para estimar el rendimiento a escala departamental en Córdoba, Argentina. Agricultura Técnica (Chile) 67(4):362-371
- Degioanni, A. 1998. Organización territorial de la producción agraria en la región de Río Cuarto (Argentina). Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares. España.
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. & P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. Agron. J. 101(3): 488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. & E. Fereres. 2009. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. Agron J. 101: 448-459.
- Leffelaar, P. 1993. On system analysis and simulation of ecological processes, with examples in CSMP and FORTRAN. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 294 pp.
- Mitchell, P.L., 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. Agricultural Systems 54:313–326.
- Pergolini S., C. Castillo & G. Espósito. 2004. Efecto de la Fertilización sobre el Consumo y la Eficiencia de Uso del Agua del Cultivo de Trigo. En: [www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/fbb6f7765d31ad3403256eb3005846ba/\\$FILE/Fertilizaci%C3%B3n-Consumo%20y%20EUA-Trigo.pdf](http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/fbb6f7765d31ad3403256eb3005846ba/$FILE/Fertilizaci%C3%B3n-Consumo%20y%20EUA-Trigo.pdf) Consultado el: 22/09/2011
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & E. Fereres. 2009. AquaCrop--The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. Agronomy Journal. 101: 438-447.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. & E. Fereres. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agron. J. 101(3): 426-437.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.T. A., Stöckle, C. & P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. Agron. J. 101(3): 509-521.
- Van Keulen, H. 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 184 pp.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin American Meteorological Society. 63(11):1309-1313.