

EVALUACIÓN DE AQUACROP PARA SIMULAR AGUA EDÁFICA EN SOJA CULTIVADA BAJO DISTINTA DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y RADIATIVA

Peirone, L.S.^{1-3-4*}, G. Ovando², F.A. Raspa³, C.R.C. Vega³

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET);

²Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC;

³EEA INTA Manfredi;

⁴IAPCByA UNVM

*peirone.laura@inta.gob.ar

RESUMEN

Los modelos de simulación son herramientas útiles que pueden asistir a la toma de decisiones para mejorar la productividad en diferentes escenarios hídricos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño del modelo AquaCrop para estimar el nivel de agua en el suelo y la producción de biomasa en soja en la región central de Córdoba. Asimismo, el modelo se utilizó para evaluar la productividad de la soja bajo un amplio rango de los recursos agua y radiación a partir de experimentos de fechas de siembra (FS), genotipos y nivel hídrico (riego y seco). Para la calibración del modelo, se utilizaron datos de fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fPARI), contenido de agua del suelo (CAS) y la biomasa de cultivo (MS) durante la campaña 2020-21. Los datos de fPARI se utilizaron para la calibración de la cobertura del cultivo (CC). La capacidad predictiva de AquaCrop fue evaluada a través del coeficiente de determinación (R^2), la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y el índice de concordancia (d). AquaCrop simuló adecuadamente CC ($R^2=0.90$, RMSE=8.24 %, $d=0.97$), MS ($R^2=0.95$, RMSE=1.33 tn ha⁻¹, $d=0.98$) y CAS ($R^2=0.84$, RMSE=47.94 mm, $d=0.93$). Estos resultados mostraron que AquaCrop podría ser adecuado para simular con precisión la CC, la MS y el CAS bajo ambientes de distinta calidad hídrica y radiativa, lo que permitiría indagar en distintas combinaciones de manejo para la optimización de la captura y el uso de la radiación solar y el agua en soja.

Palabras clave: modelo de cultivo, *Glycine max*, biomasa, fechas de siembra, variedades.

INTRODUCCIÓN

La región pampeana oeste presenta ambientes semiáridos y alta variabilidad interanual de precipitaciones. Estas características, junto con condiciones edáficas como suelos de texturas gruesas hace a esta región altamente susceptible a sequías. Frente a este escenario es indispensable el desarrollo de nuevas estrategias de manejo que permitan reducir la brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento alcanzable en seco. En estas condiciones, el diseño de sistemas de cultivo para esta región que se focalice en el uso adecuado del agua y en la estabilidad de los rendimientos puede requerir largos y costosos experimentos de campo. Una manera de abordar esta limitación es mediante el empleo de modelos de simulación de cultivos (Videla Mensegue et al., 2021). El uso de modelos de simulación podría ser importante para simular los componentes eco-fisiológicos que afectan la generación del rendimiento. Además, podría ser útil como herramienta para tomar decisiones en condiciones climáticas cambiantes, con el fin de optimizar el uso de los recursos en la producción y predecir el rendimiento de los cultivos.

Estos modelos simulan el crecimiento y desarrollo de los cultivos considerando factores como condiciones ambientales, de manejo y factores genéticos. Los modelos de simulación de cultivos pueden reproducir las



interacciones del sistema “suelo-planta-atmósfera-manejo” (Pasquel et al., 2022). Existe un gran número de modelos tales como APSIM, DSSAT, EPIC, STICS, WOFOST, CropSyst o AquaCrop, entre otros (Dhouib et al., 2022). El modelo AquaCrop ha sido ampliamente aplicado debido a que mantiene un balance entre precisión, complejidad del modelo y estabilidad. Además, Aquacrop consta de diferentes funciones que simulan el crecimiento del cultivo y separa la transpiración del cultivo de la evaporación del suelo. También se emplea para optimizar los sistemas de riego con datos limitados, lo cual es altamente intuitivo y tiene un amplio rango de aplicaciones (Li et al., 2022).

Argentina es el tercer productor mundial de soja (*Glycine max (L.) Merr.*) (Food and Agriculture Organization, FAO; <http://faostat.fao.org>) y su producción es principalmente en secano. El déficit hídrico y la variabilidad interanual son factores principales que condicionan el rendimiento. Por lo tanto, contar con modelos de simulación de cultivos regionalmente calibrados resulta de vital importancia como herramientas para el apoyo en la toma de decisiones. El objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo AquaCrop para estimar el progreso del nivel de agua en suelo y la producción de biomasa en soja en la región central de Córdoba. Complementariamente, el modelo se utilizó para evaluar el impacto de la fecha de siembra y el manejo de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

I- Sitio y diseño experimental

Se llevó a cabo un experimento en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Manfredi (31° 49' S, 63° 46' O) (Córdoba), durante la campaña agrícola 2020-2021. El suelo sobre el que se realizó el experimento es un Haplustol éntico, serie Oncativo, con capacidad de almacenaje de agua útil de 313 mm (2m). Se evaluaron dos fechas de siembra (FS₁, 26/10/2020, y FS₂, 27/11/2020), bajo dos niveles hídricos (riego y secano) y dos genotipos de distinto grupo de madurez (DM4612 y DM53i53). En los tratamientos con riego, el contenido de agua del suelo se mantuvo en los porcentajes a capacidad de campo, regando con un sistema de goteo. El experimento fue sembrado bajo un diseño de parcelas sub-subdivididas con tres repeticiones, siendo la fecha de siembra, la condición hídrica y el genotipo la parcela principal, sub-parcela y sub-sub-parcela, respectivamente. Cada parcela consistió en 6 surcos de 10 metros de largo separados a 0.52 m. El contenido de agua (CAS) en el suelo se midió gravimétricamente en las etapas fenológicas de siembra, R3, R6 y R7 (Fehr y Caviness, 1977). Para ello, se tomaron muestras de suelo a intervalos de 20 cm hasta los 200 cm de profundidad. La fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (fPARi) se estimó utilizando un sensor de luz cuántico de línea de 1 m (Cavadevices, Buenos Aires, Argentina) entre las 11:00 y las 13:00 horas en días despejados. Se realizaron mediciones por encima y debajo del canopeo entre la emergencia del cultivo y R7. Los datos de fracción de PARi interceptada por el cultivo (fPARi) fueron utilizados para comparar los valores simulados de la cobertura del cultivo (CC, %) por el modelo AquaCrop. La biomasa seca total (MS) se evaluó en diferentes momentos durante el ciclo del cultivo mediante la cosecha de plantas de surcos centrales en una superficie de 0.5 m². Las plantas se secaron en estufa a 60 °C hasta peso constante. Las variables meteorológicas utilizadas para correr el modelo fueron registradas en la estación de INTA Manfredi.

II- Estadísticos empleados en la calibración de Aquacrop

El desempeño del modelo en la estimación de los parámetros biofísicos del dosel (cobertura y biomasa) y de la humedad del suelo se evaluó estadísticamente contrastando las estimaciones con la información correspondiente medida de campo. En el análisis se emplearon los estadísticos R², *d* y RMSE, que se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:



$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})(est_i - \overline{est})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2 \sum_{i=1}^n (est_i - \overline{est})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - est_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|est_i - \overline{obs}| + |obs_i - \overline{obs}|)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (est_i - obs_i)^2} \quad (3)$$

donde: R^2 = coeficiente de determinación, d = índice de concordancia, RMSE = raíz del error cuadrático medio, est_i = variable estimada por el modelo, \overline{est} = promedio de la variable estimada por el modelo, obs_i = variable observada, \overline{obs} = promedio de la variable observada, n = tamaño de la muestra.

Los valores de R^2 pueden ir de 0 a 1; valores próximos a 1 muestran una buena concordancia entre los valores observados y los estimados (es decir, que la mayoría de la variancia de los datos observados es explicada por el modelo). Valores de R^2 mayores que 0,80 son recomendados para estudios de simulación de cultivos. Los valores del índice d pueden variar entre 0 y 1 siendo este último un valor que refleja una perfecta concordancia entre los valores observados y los estimados. Un índice d mayor que 0,7 es aceptable para la calibración en agronomía. Los valores de RMSE pueden ir de 0 a infinito, siendo mejor el modelo mientras menor sea el RMSE. Modelos con valores porcentuales de RMSE menores que 10% es considerado excelente, entre 10 y 20% "bueno", entre 20 y 30% "satisfactorio" y mayores a 30% "pobre". Para rendimientos y biomasa se recomienda un RMSE máximo de 15% (Adeboye et al., 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1, se muestran el rango de valores observados y estimados para la CC, la biomasa y CAS y los estadísticos obtenidos durante el proceso de simulación en AquaCrop. A través de combinaciones de manejo que impactan la captura y uso del recurso radiactivo e hídrico se lograron amplios rangos observados y estimados para las tres variables. Los valores medidos y simulados de CC, MS y CAS se muestran en la Fig. 1. Se observó una buena correlación entre los valores de CC observados y simulados (Tabla 1, Fig. 1, $R^2=0.90$). El RMSE (8.24%) fue bajo, resultando una buena calibración. El índice d (0.97) fue bueno para todos los tratamientos. Para la MS, el R^2 calculado fue de 0.95, lo que indica que los valores observados y simulados fueron estadísticamente similares. La calibración fue buena para MS (tabla 1, Fig. 1, RMSE=1.33 tn ha⁻¹, $d=0.97$). El CAS simulado por AquaCrop mostró un ajuste adecuado con respecto a las mediciones gravimétricas realizadas hasta 2 m de profundidad ($R^2=0.84$), considerándose, por ende, aceptable (Tabla 1, Fig. 1., RMSE=47.94 mm, MAE=38.59 mm, $d=0.93$).

Tabla 1. Rango de variación de datos observados y estimados para tres variables evaluadas desde la siembra a R7 y comparación de estadísticos

	N	Rango observados	Rango estimados	R^2	d	RMSE
Cobertura de cultivo ((%)	48	13-100	17.5-99	0.90	0.97	8.24
Biomasa seca (tn ha ⁻¹)	31	0.51-21.28	0.64-17.04	0.95	0.98	1.33
Contenido de agua en suelo (mm)	20	319.5-602.2	376.1-648.8	0.84	0.93	47.94

Coeficiente de determinación (R^2), raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), índice de concordancia (d).



AquaCrop mostró un buen desempeño para simular las variables evaluadas. Resultados similares fueron obtenidos por Adebeye et al. (2021) quienes emplearon el modelo AquaCrop para evaluar optimización de la fertilización y la productividad del agua en soja, y presentaron para CC valores de R^2 entre 0.90 y 0.98 y d entre 0.98 y 1.00, en tanto que para biomasa obtuvieron valores de R^2 , RMSE y d de 0.95, 1.33 tn ha^{-1} y 0.98, respectivamente. Abedinpour (2020), por su parte, informó valores de R^2 y RMSE de 0.95 y 0.40 tn ha^{-1} , respectivamente cuando empleó AquaCrop para simular la materia seca del cultivo de soja con diferentes fechas de siembra y niveles de déficit de riego.

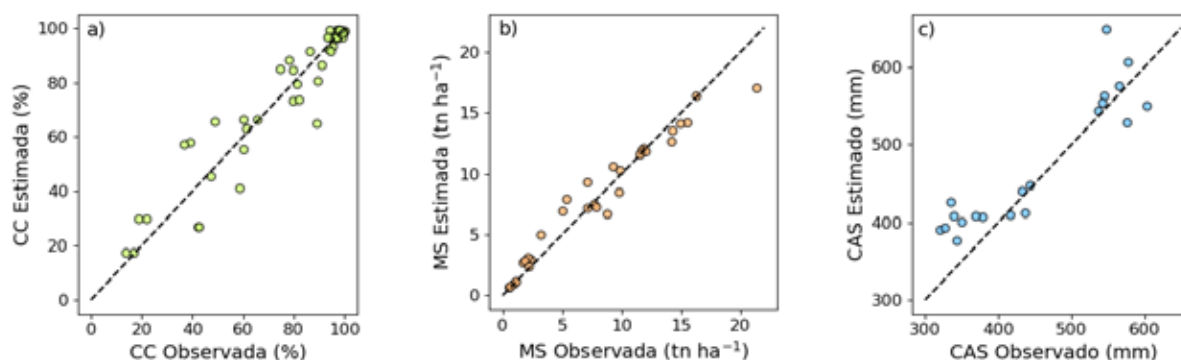


Figura 1. Valores de a) Cobertura del cultivo de soja (CC, %) b) Biomasa (MS, tn ha^{-1}) y c) Contenido de agua del suelo (CAS, mm), observados y estimados por AquaCrop para todos los tratamientos. La línea discontinua representa la función identidad (1:1).

En cuanto a CAS, Adebeye et al. (2021) encontraron que el desempeño en la simulación fue bueno (R^2 de 0.75 y RMSE de 11.5 mm).

Complementariamente en este estudio, AquaCrop se utilizó para evaluar la captura de la radiación solar y la productividad de sojas cultivadas bajo un amplio rango de recursos hídricos y radiativos logrados a partir de combinaciones entre FS, niveles hídricos y variedades (Fig. 2). En la primera fecha de siembra, el riego tuvo un efecto más marcado sobre la cobertura y la duración del cultivo en comparación con el secano. Por el contrario, en fechas de siembra tardías, los patrones de intercepción de radiación solar no difirieron entre riego y secano. Los dos genotipos alcanzaron los valores óptimos de intercepción para maximizar tasas de crecimiento (Andrade et al., 2005) pero sus ciclos fueron más cortos en comparación con la fecha de siembra temprana. Dichos efectos pueden ser explicados a través de cambios en temperatura y fotoperíodo, factores que aceleran las tasas de desarrollo.

En línea con el patrón de captura de radiación, la biomasa fue máxima en fecha temprana y bajo riego y contribuyó a mayores rendimientos en grano. En la FS₁ bajo riego, los rendimientos oscilaron entre 5.4 y 6 tn ha^{-1} , mientras que bajo secano variaron entre 4.1 y 4.4 tn ha^{-1} . Dichos rendimientos estarían en línea con los rendimientos potenciales estimados para la región (Aramburu Merlos et al., 2015). Como era esperable, en FS₂ el rendimiento disminuyó (3.7 a 4.1 tn ha^{-1} en DM4612 y DM53i53, respectivamente) aún bajo riego. Los rendimientos en secano de la FS₂, fueron de 3.9 y 3.7 tn ha^{-1} (para DM4612 y DM53i53, respectivamente). Interesantemente, entonces, las brechas debidas al recurso hídrico fueron más marcadas en fechas tempranas que en tardías.

La poca diferencia entre los rendimientos observados en la FS₂ de los tratamientos de riego y secano para las dos variedades fue explicada por la transpiración del cultivo, que fluctuó entre 350,4; 344,2; 358,4 y 351,1 mm (para DM4612 bajo riego, DM4612 en secano, DM53i53 bajo riego y DM53i53 en secano, respectivamente). Por otra parte, para la primer fecha de siembra, el modelo estimó 428,9; 346,8; 442,4 y 360,6 mm (para DM4612 bajo riego, DM4612 en secano, DM53i53 bajo riego y DM53i53 en secano, respectivamente).



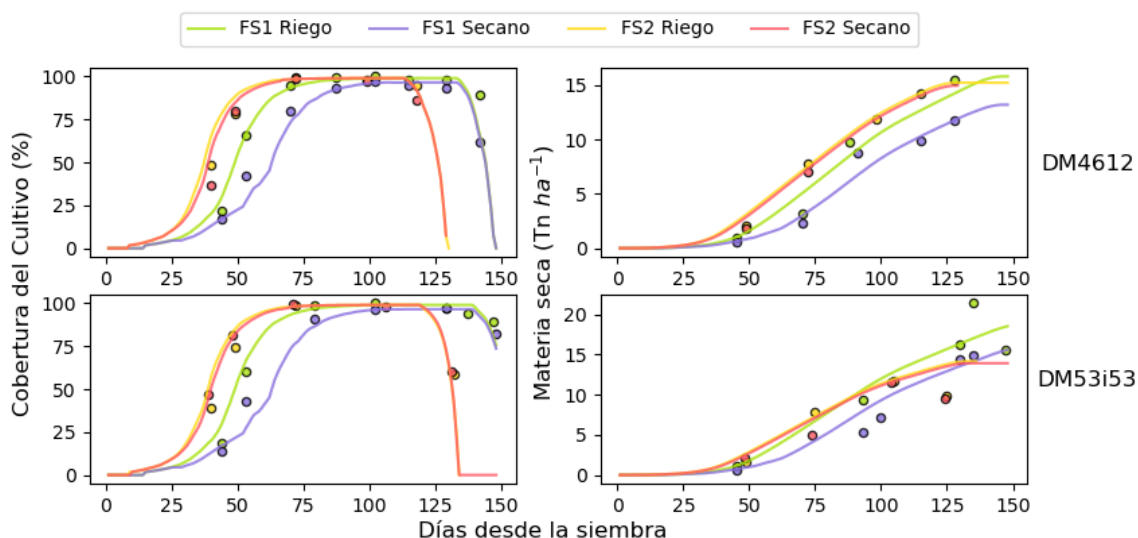


Figura 2. Evolución de la Cobertura del cultivo (izquierda) y la Materia seca de la parte aérea (derecha) para las variedades DM4612 (arriba) y DM 53i53 (abajo) en las dos fechas de siembra (FS₁ y FS₂) con riego y en seco.

Finalmente, y teniendo en cuenta la bondad de ajuste del modelo AquaCrop para sojas cultivadas en el centro de Argentina, se espera a futuro indagar en combinaciones de manejo bajo distintos escenarios hídricos con el fin de determinar aquellas que maximicen la productividad del agua.

CONCLUSIONES

La calibración del modelo AquaCrop bajo ambientes de distinta calidad hídrica y radiativa permitió simular con precisión la cobertura del cultivo, la biomasa del cultivo de soja y el contenido de agua en el suelo. A partir de los resultados de este estudio, AquaCrop podría utilizarse para estimar el CAS, la MS y la CC, lo que permitiría indagar en estrategias para la optimización del uso de los recursos o la captura y uso de la radiación solar y el agua en soja. Estudios posteriores requerirán la validación de estas variables, así como también la simulación y validación del rendimiento y productividad del agua para el cultivo de soja en la región central de Córdoba.

BIBLIOGRAFÍA

- Abedinpour, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model in soybean cultivation under different planting dates and deficit irrigation treatments. *Iran Agricultural Research*, 39(2), 37-46.
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Adekalu, K. O., & Osunbitan, J. A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*, 8(3), 419-436.
- Andrade, F.H., Sadras, V.O., Vega, C.R.C., Echarte, L., 2005. Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean. *Journal of Crop Improvement* 14, 51-101.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184, 145-154.
- Dhouib, M., Zitouna-Chebbi, R., Prevot, L., Molenat, J., Mekki, I., & Jacob, F. (2022). Multicriteria evaluation of the AquaCrop crop model in a hilly rainfed Mediterranean agrosystem. *Agricultural Water Management*, 273, 107912.
- FAO Food and Agriculture Organization (2021), Disponible en <http://faostat.fao.org>. Consultado el 29/08/2022.
- Fehr, WR. y Caviness, CE. (1977). Stages of soybean development. Ames, IO, Iowa State University, Special Report 80.11.
- Heng, L. K., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T., & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal* 101, 488-498
- Hsiao, T. C., Heng, L.K., 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. *Agronomy Journal*, 101:448- 459.



- Li, Z., Feng, B., Wang, W., Yang, X., Wu, P., & Zhuo, L. (2022). Spatial and temporal sensitivity of water footprint assessment in crop production to modelling inputs and parameters. *Agricultural Water Management*, 271, 107805.
- Montoya, F., & Otero, A. (2019). Is irrigating soybean profitable in uruguay? a modeling approach. *Agronomy Journal*, 111(2), 749-763.
- Pasquel, D., Roux, S., Richetti, J., Cammarano, D., Tisseyre, B., & Taylor, J. A. (2022). A review of methods to evaluate crop model performance at multiple and changing spatial scales. *Precision Agriculture*, 1-25.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. (2009) AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying principles. *Agronomy Journal* 101(3):426–37.
- Videla Mensegue, H. V., Caviglia, O. P., Degioanni, A., Marcos, J., & Bonadeo, E. (2021). Calibration and validation of soil water balance (SWB) model in the Inner Argentinian Pampas. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105892.

