

ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluación del modelo aquacrop para simular la biomasa acumulada en alfalfa a partir de rendimientos históricos de Rafaela, Santa Fe

Evaluation of the aquacrop model to simulate accumulated alfalfa biomass from historical yields in Rafaela, Santa Fe

Avaliação do modelo aquacrop para simular a biomassa acumulada em alfafa a partir dos rendimentos históricos em Rafaela, Santa Fe

Martín, Beatriz ; Coronel, Alejandra 

Facultad de Ciencias Agrarias, UNR

bmartin.unr@gmail.com

Recibido: 03/2023 Aceptado: 09/2023

DOI: <https://doi.org/10.35305/agro42.e037>

Resumen

AquaCrop es un modelo desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO que simula el crecimiento de cultivos herbáceos en función del consumo de agua. Integra el efecto de las variables edáficas y climáticas, junto con las variables de manejo, para representar la producción en respuesta al agua en el sistema suelo-planta. En el presente trabajo fue calibrado para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.), mediante el uso de datos de corte que se disponen para la especie de la Red de cultivares de INTA Rafaela, entre los años 2000 a 2018, cuyos cuatro últimos años corresponden a los utilizados en la validación. El modelo proporcionó una buena simulación de la biomasa aérea acumulada en cada corte. Las pruebas estadísticas que evaluaron la calibración del modelo, y sus resultados fueron: el coeficiente de determinación (R^2) de 0,92; la raíz del error cuadrático medio (RSME) con el valor de 178 kg de MS ha⁻¹; coeficiente de eficiencia de Nash (E) con valores de 0,91; el error cuadrático medio normalizado del 15% y el índice de acuerdo (d) con valor de 0,97 para cada corte. Las variables y parámetros utilizados en la validación, mostró un nivel de exactitud adecuado. La biomasa aérea acumulada muestra una desviación que no supera los ± 200 kg de MS ha⁻¹ comparando los valores simulados y medidos, por lo cual el modelo es capaz de reproducir de forma confiable la variable analizada.

Palabras clave: *Medicago sativa*; producción de biomasa; crecimiento

Abstract

AquaCrop is a model developed by FAO's Land and Water Division to simulate the growth of herbaceous crops as a function of water consumption. It integrates the effects of edaphic, climatic and management variables to model yield in response to water in the soil-plant system. In the present work, the model was calibrated for alfalfa (*Medicago sativa* L.), using crop cut data available from the INTA Rafaela Cultivar Network for the years 2000 to 2018. We used data for the last four years for the validation. The model provided a good simulation of the accumulated aerial biomass in each cut. The statistical tests to evaluate the calibration of the model were: the coefficient of determination (R^2), which showed a value of 0.92; the root mean square error (RSME), with a value of 178 kg of DM ha⁻¹; the Nash efficiency coefficient (E) with values of 0.91; the normalized mean square error, with a value of 15%; and the agreement index (d), with a value of 0.97 for each cut. The variables and parameters used in the validation showed an adequate level of accuracy. The accumulated aerial biomass showed a deviation not higher than ± 200 kg DM ha⁻¹ between the simulated and measured values, indicating that the model is able to reliably reproduce the variable analyzed.

Keywords: *Medicago sativa*; biomass production; growth

Resumo

AquaCrop é um modelo desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da FAO que simula o crescimento das culturas herbáceas em função do consumo de água. Integra o efeito das variáveis edáficas e climáticas, juntamente com as variáveis de manejo, para representar a produção em resposta à água no sistema solo-planta. No presente trabalho

foi calibrado para alfalfa (*Medicago sativa* L.), utilizando dados de corte disponíveis para a espécie na rede de cultivares do INTA Rafaela, para os anos 2000 a 2018, cujos últimos quatro anos correspondem aos utilizados na validação. O modelo forneceu uma boa simulação da biomassa aérea acumulada em cada corte. Os testes estatísticos que avaliaram a calibração do modelo, e os seus resultados foram: o coeficiente de determinação (R^2) de 0,92; a raiz do erro quadrático médio (RSME) com o valor de 178 kg de MS ha⁻¹; o coeficiente de eficiência de Nash (E) com valores de 0,91; o erro quadrático médio normalizado de 15% e o índice de concordância (d) com um valor de 0,97 para cada corte. As variáveis e parâmetros utilizados na validação mostraram um nível de precisão adequado. A biomassa aérea acumulada mostra um desvio que não excede ± 200 kg de MS ha⁻¹ comparando os valores simulados e medidos, pelo que o modelo é capaz de reproduzir de forma fiável a variável analisada.

Palavras chave: *Medicago sativa*; produção de biomassa; crescimento

Introducción

En Argentina la alfalfa (*Medicago sativa* L.) constituye el principal componente de la oferta forrajera de las pasturas implantadas ([Hijano y Basigalup, 1995](#)). Por su adaptación a un amplio rango de condiciones agroclimáticas y por su capacidad de producir elevada cantidad de forraje de alta calidad, es una especie utilizada en sistemas de producción de carne y leche en distintas regiones ganaderas templadas del mundo ([Racca et al., 2001](#)).

Su productividad depende, entre otros factores, del adecuado aprovechamiento de las condiciones agroclimáticas y de la oferta de nutrientes ([Díaz Zorita, 2008](#)). Entre las variables climatológicas y factores abióticos que han sido reportados como determinantes en su producción, se encuentra la temperatura, el fotoperíodo, la radiación solar, las precipitaciones, la evapotranspiración y la humedad disponible en el suelo ([Grismer, 2001](#); [Collino et al., 2007](#); [Lindenmayer et al., 2011](#)). Las prácticas óptimas de manejo, como la fecha de siembra, la selección de cultivares y la fertilización, entre otras, se consideran como un segundo pilar de la productividad en alfalfa.

Para estudiar las respuestas de los cultivos a la fertilidad del suelo y las condiciones ambientales, a menudo se utilizan modelos de cultivos para complementar los experimentos de campo (Jones et al., 2006). AquaCrop es un modelo descriptivo que simula el desarrollo del cultivo, presentando la interacción entre el suelo, la planta y la atmósfera ([Raes et al., 2009](#); [Steduto et al., 2009](#)). Ha sido parametrizado y probado para una amplia gama de cultivos ([Farahani et al., 2009](#); [Geerts et al., 2009](#); [Hsiao et al., 2009](#); [Karunaratne et al., 2011](#); [Steduto et al., 2009](#)) bajo diferentes condiciones ambientales, lo que ilustra que el modelo podría simular con precisión la respuesta del rendimiento al agua. Sin embargo, no ha sido parametrizado para alfalfa.

Este estudio tuvo como objetivo calibrar y validar el modelo AquaCrop para las condiciones del cultivo de alfalfa en una región mesotérmica subhúmeda-húmeda de Argentina.

Materiales y Métodos.

Área de estudio

El lugar de estudio fue la localidad de Rafaela, comprendida entre los 31, 18° de Latitud Sur y 61,55° de Longitud Oeste, a 100 m de altura del nivel del mar, dentro de la ecorregión pampeana moderadamente húmeda de Argentina ([Figura 1](#)).

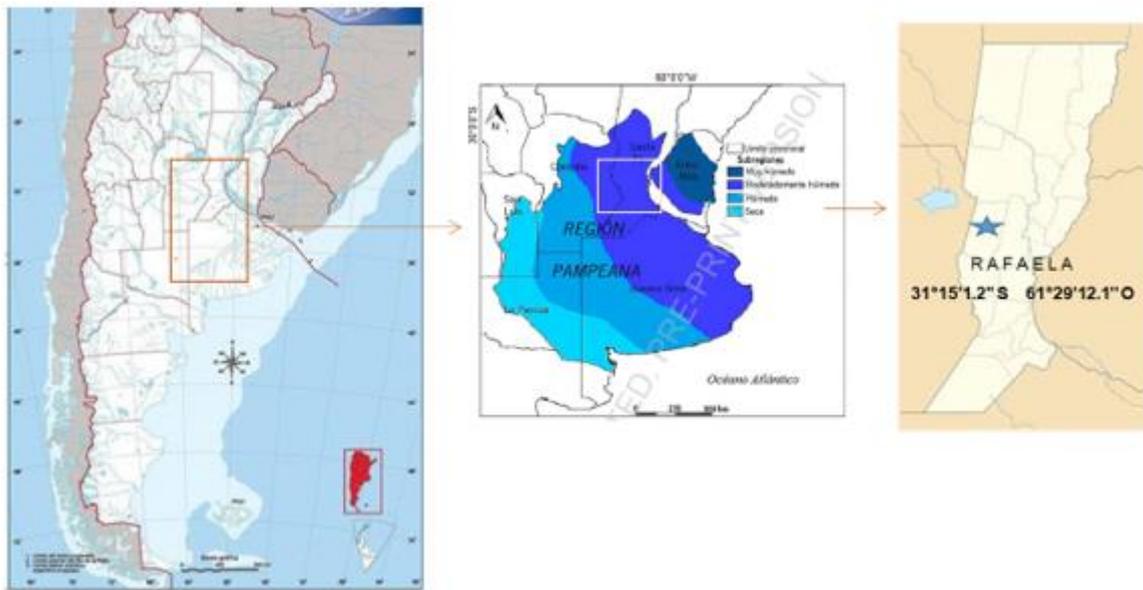


Figura 1. Ubicación de la localidad de Rafaela, en la ecorregión pampeana de la provincia de Santa Fe.

Características del clima

El clima de la región es subhúmedo a húmedo y mesotermal, con una temperatura media anual de 19,2° C, la temperatura media del mes más frío (julio) de 12,1°C y la temperatura media del mes más cálido (enero) de 26,2°C, con una precipitación anual acumulada de 955 mm (promedio histórico). La información meteorológica fue obtenida del SIGA - Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico- de INTA (años 2000 al 2018).

Características del suelo

El suelo se clasificó como del tipo Argiudol típico, profundo, bien a moderadamente bien drenado, desarrollado en paisajes muy planos y extensos, ampliamente distribuido en el sector centro-oeste de la “Pampa Llana Santafesina” (Panigatti *et al.* 1971, Mosconi *et al.*, 1981). Se destaca por presentar valores de pH próximos a 6,2 meq /100g de suelo, estar bien provistos de MO (2,8%) y buenos niveles de fósforo (P=24 ppm). Presenta una secuencia de horizontes A1 (0-22 cm), B1 (22-27 cm), B21t (27-35 cm), B22t (35-70 cm); C1 (+70 cm). La textura del horizonte superficial es franca (arena= 28%, limo= 47%; arcilla= 25%), mientras que el resto de los horizontes poseen textura franco arcillosa. Esta característica le otorga una considerable capacidad de almacenaje de agua útil de 200 mm a 1,5 m de profundidad.

Datos de campo y observaciones

Los datos para la calibración y la validación de AquaCrop fueron obtenidos de experimentos de campo informados por la Red de Evaluación de Cultivares de Alfalfa, conducida por INTA en Argentina. Se utilizaron los valores promedio de producción de materia seca (MS), de todos los cultivares de grados de reposo invernal (GRI) 8 a 10. La Red evalúa la biomasa forrajera en cortes sucesivos que están protocolizadas (Spada, 2000; Arolfo y Odorizzi, 2015). Los ensayos están organizados en series que se siembran cada 2 años, con un período de evaluación de 4 años por serie. Los cortes se efectúan al 10% de floración, o cuando los rebrotes desde la corona miden aproximadamente 5 cm.

Durante el proceso de calibración del modelo, en el período comprendido entre 2000 y 2014, se utilizaron los valores promedio de la biomasa observada de todos los materiales evaluados por la RED, considerando los primeros tres años de la pastura. Cada corte respondió a un

período definido entre una fecha de inicio, que corresponde a la fecha del corte precedente, y una fecha de cosecha que era el día de corte analizado. Debido a la marcada estacionalidad en el crecimiento de alfalfa, con contrastes que alcanzaron porcentajes de 58 a 42% entre los períodos de mayor crecimiento (P-V: primavera-verano, septiembre a febrero) y menor crecimiento (O-I: otoño-invierno, marzo a agosto), se consideraron, de forma equitativa, cortes en esas estaciones de crecimiento. Asociados a estos cortes, y para permitir incluir la variabilidad en la producción, también fueron seleccionados aquellos que se realizaron en períodos climáticos húmedos, secos y normales. Para ello, se utilizaron los registros promedios históricos diarios de precipitación, y se los relacionó con las condiciones de precipitaciones del período de acumulación de la biomasa en cada corte. Si el valor era inferior o superior en un 25% a las precipitaciones históricas para ese período de acumulación de la biomasa, se consideraron valores productivos que responden a períodos de déficit o excesos hídricos, respectivamente; para el resto de los casos se consideran neutros.

De esta manera para la calibración del modelo fueron analizados 122 cortes en diferentes períodos de crecimiento y situación climática. La validación fue realizada con 18 cortes del periodo 2015-2017.

Evaluación y validación del modelo AquaCrop

Dentro del modelo AquaCrop se tiene una serie de módulos que permiten ingresar las variables externas (clima, suelo y manejo), los parámetros conservativos y no conservativos (propios del cultivo específico). A continuación, se describen de manera general los requerimientos que se tuvieron en cuenta en el proceso de evaluación del modelo:

*Módulo de clima

Se utilizaron las series diarias de precipitación (P), temperaturas máximas ($T_{máx}$) y mínima ($T_{mín}$), humedad relativa (Hr), heliofanía efectiva (Hef) y velocidad del viento (Vv) para el período 2000 a 2017 de la estación Rafaela INTA.

AquaCrop no calcula la evapotranspiración de referencia (ET_o) de manera directa; para ello en este estudio se utilizó el software de circulación gratuita ET_o Calculator, desarrollado por FAO, el cual es un módulo complementario del software AquaCrop y utiliza el método FAO Penman-Monteith para obtener la ET_o en función de variables climáticas y de la localización geográfica ([Allen et al., 2006](#)). Este método combina el balance energético con el método de la transferencia de masa y deriva una ecuación para calcular la evapotranspiración de un cultivo hipotético de pasto con características específicas, a partir de datos climáticos de Hef, $T_{máx}$, $T_{mín}$, Hr y Vv. Variables que formaron parte de planillas Excel, convertidas algunas según lo solicitado por el software ET_o calculator.

*Módulo de manejo de cultivo

Contempla las siguientes variables:

Riegos: en la etapa de ajuste del módulo del cultivo de alfalfa no se aplicaron láminas de riego debido a que en las localidades consideradas la producción del cultivo es en secano.

Prácticas agrícolas: este módulo contempla la fertilidad del suelo, especialmente el nitrógeno, y aspectos que afectan el equilibrio hídrico del desarrollo y crecimiento del cultivo (límites de alguna capa compactada del suelo o rastrojo previo a la siembra). En este sentido, se destaca que estos ensayos en RED, en términos generales, se manejan en condiciones no limitantes de fertilización y protección de los ensayos, para posibilitar la máxima expresión del potencial genético de los cultivares. No obstante, el modelo permite evaluar la cantidad de biomasa verde de malezas, que puedan estar presente en el cultivo. Por estas razones, las consideraciones

metodológicas de la Red garantizarían, en líneas generales, un máximo crecimiento en cada corte realizado. Aunque, serían limitantes la presencia de plagas o enfermedades, no consideradas en el desenvolvimiento del modelo.

Otro parámetro a completar, en este módulo, es el valor de la Curva Número (CN) del sector en estudio, que depende del tipo de suelo, de la naturaleza y tipo de cobertura, del estado de compactación en relación a su uso, de la capacidad de infiltración en atención a su textura y de la condición previa de humedad. El Servicio de Conservación de Suelos de USA (1965) ha publicado extensas y amplias investigaciones sobre este factor y presenta tablas para seleccionar el valor más representativo de cada situación. Los valores varían entre 1 y 100, siendo mayor cuanto peor sea su situación. En el área en estudio, fue considerado con un valor de 82.

*Módulo suelo

Este módulo usa parámetros físicos como: textura (Tex), punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (Cc) y saturación (S). Variables consideradas a partir de la información de calicatas descritas por GEOINTA (2015).

AquaCrop también contempla, según la Tex de cada horizonte de suelo, los valores de flujo no saturado del agua (movimiento capilar) y relaciona esta capilaridad con la profundidad asignada de la napa freática. Esos valores, en el sector de ensayos de la RED en Rafaela, fueron considerados típicos de un suelo Argiudol franco limoso.

*Módulo Napa freática

Profundidad de la Napa freática (NF, en cm) registrada mensualmente en INTA Rafaela, en el período 2000-2017.

*Cultivo y parámetros específicos en alfalfa

El modelo utiliza parámetros de cultivo conservativos y no conservativos para la simulación. Los parámetros conservativos no cambian por ubicación, manejo, cultivares y tiempo. No obstante, pueden ajustarse para mejorar las simulaciones en el modelo (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009). Incluyen cobertura máxima del dosel (CCmáx); coeficiente de crecimiento del dosel (CGC); coeficiente de declive del dosel (CDC); la transpiración del cultivo (Kc) para la CCmáx; normalización de la productividad del agua (WP*) para la formación de biomasa, y los umbrales de agotamiento del agua del suelo para la inhibición del crecimiento de las hojas, de la conductancia de los estomas y de la aceleración de la senescencia del dosel.

Los parámetros no conservativos que usa el modelo se ajustaron a partir de observaciones de campo del período de corte que realiza la Red de cultivares e información local de la siembra de alfalfa en el INTA Rafaela. La metodología de evaluación de la productividad en cada corte, fue utilizada para seleccionar los periodos de acumulación de la biomasa aérea. Los ensayos de campo en Rafaela, fueron realizados en ambientes edáficos sin limitantes químicas, así los valores de estrés por salinidad o fertilización, como situación inicial, no fueron considerados.

Los parámetros específicos en la especie fueron: la cobertura inicial del dosel (CDo), relacionado con la densidad de las plantas por unidad de superficie y la cobertura de la planta (cm²), basados en valores regionales (Tabla 1). La CCmáx es un parámetro vacante para el cultivo de alfalfa, que depende de la densidad de siembra y la tasa de crecimiento del cultivo. Se señala que el desarrollo del follaje puede ser expresado a través de la cubierta verde como la fracción de la superficie del suelo cubierta por la especie. Varía desde cero en la siembra (es decir, 0% de la superficie del suelo cubierta por el dosel) hasta un valor máximo al finalizar el período de corte tan alto como 1 si se alcanza la cobertura total del dosel (es decir, el 100% de la superficie del suelo está cubierta por el dosel).

El valor del número de plantas por unidad de superficie, fue considerado uniforme en cada ciclo de producción. Para determinar ese valor, se llevaron a cabo consultas bibliográficas específicas para la localidad, utilizando referencias como Mattera (2004) y Mattera *et al.* (2009). Además, se realizaron ajustes en el número de plantas durante la calibración, que permitieron establecer el valor correcto del número de plantas en relación a los parámetros requeridos. Los ajustes correspondientes al número de plantas dejando los restantes parámetros fijos, variaron entre un 2% a un 4,5% la relación entre la productividad observada y la estimada.

Para el desarrollo de cobertura se usaron días calendario. El tiempo en alcanzar la CC_{máx}, fue la fecha considerada final de cada período de crecimiento (fecha del corte) que fue modelado. Asimismo, se estimó que el inicio de la senescencia coincidía con el momento de ocurrencia de CC_{máx}.

Araya *et al.* (2016) considera que, la cantidad de follaje en términos de CC_{máx} (en fracción o porcentaje) sería como considerar, indirectamente, el índice de área foliar, y ajusta la siguiente ecuación:

$$CC_{máx} = 1 - e^{-0.416 IAF}$$

Esta expresión da como resultado una simplificación considerable de la simulación. A los fines de fijar el valor de CC_{máx}, y basados en la información brindada por diversos autores (Heichel *et al.*, 1988; Mattera, 2004; Guzmán *et al.*, 2007 y Di Nucci de Bedendo *et al.*, 2009), fue considerado un IAF, para las estaciones climáticas, de 4,5 para P-V y 2,5 para O-I. Con esas estimaciones en la ecuación, se obtuvo la CC_{máx} del 85%, en los cortes de P-V y 65% en los de O-I. Los valores asignados en los restantes parámetros de la especie, fueron ajustados según registros bibliográficos.

Tabla 1. Información agronómica para el cultivo de alfalfa. Parámetros no conservativos utilizados en la calibración y validación del modelo AquaCrop.

| AquaCrop Version 6.0 (March 2017) | Rangos o unidad | Valor asignado | Fuente de Información |
|---|--|---|---|
| Determinación del ciclo del cultivo expresado en °GD | por días o °GD | °GD | días de acumulación transformados en $\sum^{\circ}\text{GD}$ |
| Temperatura mínima (T base, °C) por debajo de la cual no progresa el desarrollo del cultivo | Base fisiológica en especies C3 | 2,5°C para O/I y 5°C para P/V | Martín (2021), en base a Métodos propuesto por Arnold (1959). |
| Temperatura máxima (°C) por encima de la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con un aumento de la temperatura. | Base fisiológica en especies megatérmicas (C4) | 15°C para O/I y 28°C para P/V | Fick <i>et al.</i> (1988) |
| Duración total del ciclo de cultivo en grados-día de crecimiento | Periodo entre dos cortes | días de acumulación transformados en $\sum^{\circ}\text{GD}$ | |
| Coefficiente de transpiración de la especie (Kc) | 1,1-1,15. | 1,15 | French y Legg (1979) |
| I-Desarrollo del cultivo | | | |
| a-Cobertura inicial del canopeo | | | |
| Superficie del suelo cubierta por una plántula individual al 90% de emergencia (cm ²) | 0,10 a 10% | 10% cortes en el 1er y 2do ciclo, 5% cortes en el 3er ciclo | |
| Tamaño de la planta individual (crecimiento) en el primer día (cm ²) | 2 cm ² | | |
| Número de plantas por superficie | 2 plantas/m ² a 200 plantas/m ² | 200 plantas/m ² (1er ciclo), 150 plantas/m ² (2er ciclo) y 90 plantas/m ² (3er. ciclo) | Mattera (2004); Mattera <i>et al.</i> (2009). |
| Cobertura inicial de canopeo relacionados al n° plantas | 0,10% a 10% | 10% (150 a 200 plantas/m ²) 7,2% (90 plantas/m ²) | |
| b-Desarrollo del canopeo (sin estrés) | | | |
| Máxima cobertura del canopeo | 40% a 99 % | 85% (P/V) y 65% (O/I) | CC=1-exp (-0,416 IAF) (Araya <i>et al.</i> , 2016) |
| Coefficiente (CDC) de crecimiento en la cubierta del dosel (en fracción por día) | 1% a >15% | variaron entre 10% a 15 % | valor relacionado a los datos ingresados en °GD en cada corte |
| Coefficiente de disminución del dosel (CDC): Disminución de la cubierta del dosel (en fracción por día) | 3,1% a 30% | muy lenta declinación 3 a 5 % /día | Thomas y Howarth (2000); Terán Cháves (2015) |
| c-Profundización de raíces sin restricción del suelo | | | |
| Mínima profundidad de enraizamiento efectiva (m) | 0,80 m a 1,50 m de profundidad a los 120 días de sembrada la especie | 1,5 m | Bonadeo <i>et al.</i> (2006) |
| Máxima profundidad de enraizamiento efectiva (m) | 4 m | 3,5 m | Collino <i>et al.</i> (2007) |
| Tiempo en días o °GD hasta la máxima profundidad de enraizamiento | días o °GD | =Ccmáx | La cantidad de días o °GD después de sembrada la especie para lograr la máxima profundidad de enraizamiento será aquella que logre la Ccmáx |
| Factor de forma que describe la expansión de la zona de raíces | lineal o no lineal | 5 (curva moderadamente convexa) | Brown <i>et al.</i> (1972) |

Los valores de evapotranspiración e índice de productividad del agua, sin estrés, fueron considerados según fundamentos bibliográficos ([Tabla 2](#)). Se diferenció un índice de cosecha (HI) para orientar a la obtención de biomasa forrajera. Para ello, se consideró definir la biomasa aérea cosechada como la cantidad de forraje por unidad de área de suelo por encima de los rebrotes de la corona (5 cm, según metodología de los ensayos de corte de la Red). En consecuencia, se partió de un valor inicial del 70%, según el trabajo de Sevilla ([2004](#)) para iniciar la calibración de este parámetro en el modelo.

Tabla 2. Evapotranspiración del cultivo, índice de consumo de agua e índice de cosecha en alfalfa. Valores conservativos utilizados en la simulación de la biomasa forrajera en el modelo AquaCrop.

| AquaCrop Version 6.0 (March 2017) | Rangos o unidad | Valor asignado | Fuente de Información |
|---|---------------------------------|--|---|
| II-Evapotranspiración (sin estrés) | | | |
| a-Coeficientes: evaporación del suelo: efecto de la protección del dosel al final del período analizado | 25 % a 95% | 40% (P/V); 30% (O/I) | Allen <i>et al.</i> (1998) |
| b-Transpiración cultivo bien regado | 0,25 a 1,5 | 1,5 | Raes <i>et al.</i> (2009); Terán Cháves (2015) |
| c-Patrón de extracción de agua | fracciona en 4 niveles | 40% 1er estrato- 30% 2do estrato- 20% 3er. estrato y 10% último estrato | Walley <i>et al.</i> (2005); Gregory (2006); Gregory <i>et al.</i> (2009) |
| III-Producción de cultivos (sin estrés) | | | |
| a-Productividad del agua normalizada para ETo y CO ₂ (WP*) (gramos/m ²) | C3 rango 15-20 g/m ² | 15 g/m ² | Steduto <i>et al.</i> (2007) y Steduto <i>et al.</i> (2009). |
| b- Índice de Cosecha (HI) | 2% a 100% | 75% | Sevilla (2004) |

El modelo detecta la sensibilidad de la especie al estrés, variando datos de entrada de parámetros climáticos, parámetros del cultivo, profundidad de raíces y el factor de agotamiento para el estrés hídrico y del suelo; encontrando, por ejemplo, alteraciones en la expansión del dosel, cierre de estomas, hasta senescencia del dosel. Los rangos de resistencia en situaciones de estrés hídrico en suelo y causados por temperaturas extremas, que fueron considerados en el modelo, se basaron en fuentes bibliográficas y recomendaciones propuestas por Raes ([2017](#)) ([Tabla 3](#)).

Tabla 3. Resistencia al estrés hídrico en suelo, estrés térmico y estrés salino. Valores conservativos utilizados en la simulación de la biomasa forrajera en alfalfa en el modelo AquaCrop.

| AquaCrop Version 6.0. (March 2017) | Rangos o unidad | Valor asignado | Fuente de Información |
|---|--|---|---|
| IV-Estrés hídrico del suelo | | | |
| a- Expansión del dosel | extremadamente sensible a extremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos p upper= 0 a 0,35; p lower=0,35 a 0,70) | moderadamente tolerante (p upper= 0,25; p lower= 0,6) | Como fracción del TAW, por encima de este valor se detiene el crecimiento foliar. Steduto et al. (2009) |
| Estrés hídrico: factor de ajuste para la corrección de ETo sobre el agotamiento del agua del suelo. | | | |
| b-Cierre estomático (ajustar Ks por ETo) | extremadamente sensible a extremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos p upper= 0,35 a 0,75) | moderadamente tolerante (p upper= 0,65). Por encima de este valor el estoma se cierra | Hsiao, (1973); Emberson et al. (2000) |
| Factor de forma para el cierre de estomas | lineal o no lineal | Factor de ajuste=3 | Curva moderadamente convexa |
| c- Senescencia temprana del dosel | extremadamente sensible a extremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos p upper= 0,35 a 0,80) | moderadamente tolerante (p upper= 0,85 en P/V; 0,65 en O/I) | Por encima de este valor comienza la senescencia temprana. Raes (2017) |
| Factor de forma para la senescencia del dosel | lineal o no lineal | shade factor=3 | Curva moderadamente convexa |
| d-Esfuerzo de aireación | no estresado en anegamiento a muy sensible al anegamiento (rangos= saturación - (0 a 15% de Vol de poros saturados) | 15 % del volumen total de poros del suelo saturados | Raes (2017) |
| Número de días después de los cuales la aireación deficiente es completamente efectiva | no estresado en anegamiento a muy sensible al anegamiento | 3 días | |
| V-Esfuerzos por temperatura del aire | | | |
| Umbral de temperaturas para el desarrollo del cultivo | valor según especie | 5°C/28°C rango P/V y 2,5°C/15°C rango O/I | Doorenbos y Pruitt 1977; Collino et al. (2005); Brown et al. (2005) |
| La transpiración de los cultivos afectada por el estrés por frío | valor según especie | 5°C P/V y 2,5°C O/I | Raes (2017) |
| VI-Estreses de salinidad del suelo | | | |
| a-Tolerancia a las sales | extremadamente sensible (hasta 6 dS/m) a extremadamente tolerante al estrés hídrico (rangos= 8 dS/m a 37 dS/m) | lower=2 dS/m; upper= 8 dS/m | Fick et al. (1988) |
| b-Reducción de Biomasa en suelo bien regado | 0% a 100% de reducción de la biomasa | 25% reducción de la biomasa | Raes (2017) |

El parámetro condición inicial en cada simulación, tanto de la humedad previa presente en la superficie del suelo como de la fracción de la cubierta por la vegetación precedente o B_i , influye sobre el valor final de la producción estimada (PE). Esa cubierta fue entendida como remanente de biomasa verde del corte anterior. En este estudio y para calibrar el valor del parámetro, se fueron probando diferentes B_i hasta determinar el mejor valor con el resto de los parámetros del modelo ya fijados.

El modelo calcula el total de la biomasa producida y separa de ese total la producción estimada (PE) como una fracción de cosecha. La calibración fue realizada mediante la comparación entre la serie de PE con la MS acumulada en los cortes secuenciados de los registros disponibles en la Red o producción observada (PO) para diversos ciclos de crecimiento (primer a tercer ciclo, registrados en el período 2000-2014).

Índices estadísticos utilizados en la evaluación del modelo.

La evaluación de la exactitud del modelo se realizó a partir datos observados y simulados mediante un gráfico de dispersión. Asimismo, se utilizaron los siguientes índices estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio absoluto (RMSE) y normalizado (NRMSE), eficiencia del Modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e índice de concordancia (índice d).

Resultados

Con la información detallada en la metodología ([Tablas 1, 2 y 3](#)) se logró calibrar el modelo, estimándose un grupo de parámetros conservativos para el cultivo de alfalfa. El procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de Raes *et al.* (2017).

Para definir el valor asignado en el HI, fue necesario realizar simulaciones independientes de esta variable, resultando el mejor valor en la calibración del 75%.

De forma general se considera que la calibración simuló bien las biomásas acumuladas en los cortes al haberse alcanzado un valor del coeficiente de determinación de $R^2=0,92$ ([Figura 2](#)).

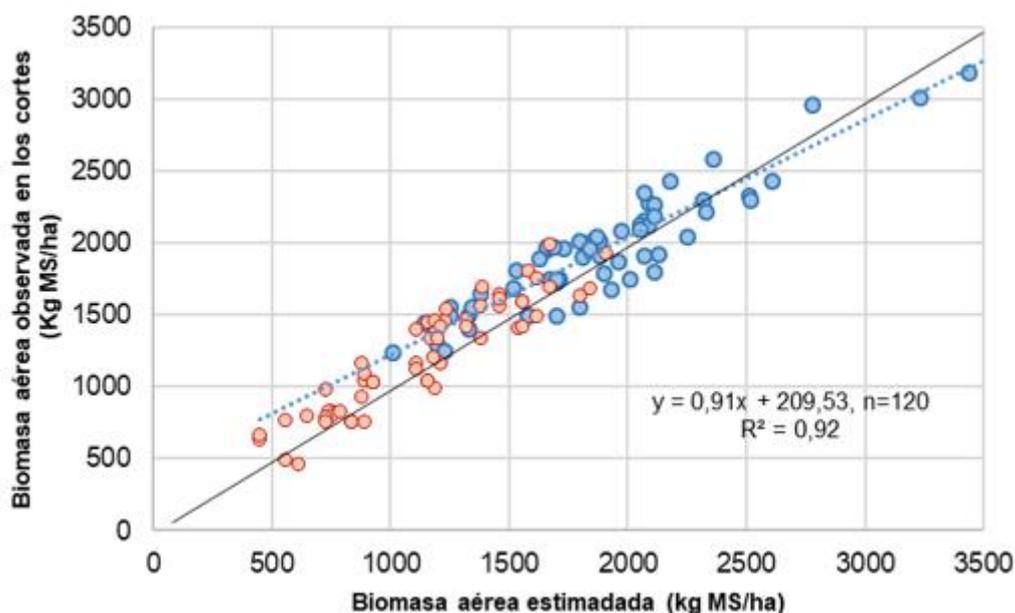


Figura 2. Relación entre valores de la biomasa observados en cada corte y la biomasa estimada a partir del Modelo Aquacrop (Mg MS/ha). Los puntos celestes corresponden a producciones en P-V y los naranjas a las producciones O-I durante el ciclo 2000-2014, en la localidad de Rafaela. La línea continua corresponde a la recta identidad (1:1) y la de puntos al modelo.

Se aprecia que el modelo tendió a subestimar los valores de biomasa que se relacionaron con los cortes de O-I (valores medios de PO= 1380 kg MS/ha), pero tendió a aumentar la exactitud en los valores de P-V (valores medios de 2000 Kg MS/ha).

Respecto a los índices estadísticos ([Tabla 4](#)), los valores de RMSE, que señalan la desviación media entre los valores de la biomasa aérea en cada corte y la biomasa simulada, resultaron ser bajos: 178 kg MS ha⁻¹ corte⁻¹. La estimación de EF fue alta, según los criterios de Krause *et al.* (2005) y Moriasi *et al.* (2007). NRMSE fue el parámetro estadístico que permitió considerar la simulación como buena (rango de valores entre 10 y 20%). Por su parte, el índice de concordancia o de agregación de Willmott (d), detectó un alto grado de acercamiento entre las PO y las PE (d=0,97).

Tabla 4. Índices estadísticos para evaluar los resultados de la calibración del Modelo Aqua Crop, en alfalfa, para la localidad de Rafaela.

| Descripción | Valoración |
|----------------|--------------|
| R ² | 0,92 |
| RMSE | 178 Kg MS/ha |
| EF | 0,9 |
| NRMSE (%) | 11% |
| d | 0,97 |

En líneas generales, los estadísticos utilizados en este trabajo para la calibración del modelo fueron suficientes para obtener un alto nivel de aproximación en la estimación -bajo las condiciones ambientales y edáficas de la localidad de Rafaela- de la acumulación de la biomasa forrajera de alfalfa en cada corte.

En el proceso de validación, los parámetros calibrados se mantuvieron inalterables a lo largo de las temporadas, modificándose sólo el número de plantas por año de producción ([Tabla 1](#)) y las condiciones previas al inicio de la modelación, humedad edáfica y Bi, en función de si el año era seco, húmedo o normal. Los datos del período 2015-2017 se validaron con 18 cortes que fueron realizados en el primer y segundo ciclo de crecimiento (2015/2016 y 2016/2017, respectivamente). Para analizar la robustez de estos resultados generales, se presentan en la [Figura 3](#), las relaciones entre PO y PE y los restantes índices estadísticos aplicados.

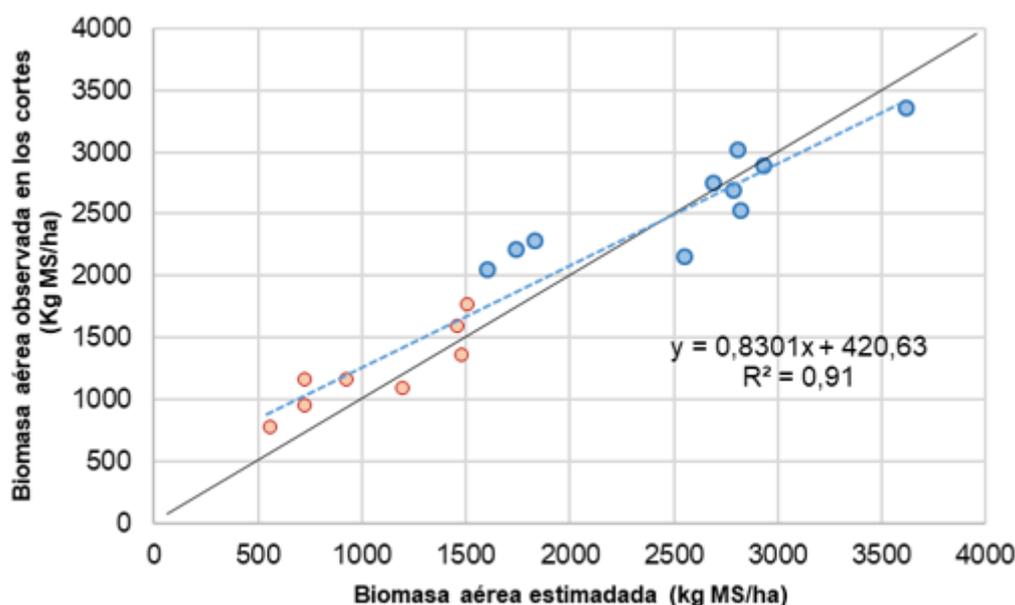


Figura 3. Relación entre rendimientos observados y simulados en alfalfa en la localidad de Rafaela durante el ciclo 2015-2017. Los puntos celestes corresponden a producciones en P-V y los naranjas a las producciones O-I. La línea continua corresponde a la recta identidad (1:1) y la de puntos al modelo.

Si bien se observó un buen ajuste, el modelo presentó una sobrestimación de los datos simulados a medida que la biomasa de los cortes fue aumentando, hasta llegar a un punto de inflexión en la biomasa real (2500 kg de MS ha⁻¹), a partir del cual los valores simulados subestimaron las producciones.

A partir de su validación, el modelo tuvo un buen comportamiento. El análisis de regresión lineal entre los valores observados y estimados arrojó, un alto coeficiente de determinación (0,79). Se observó una diferencia de 289 kg de MS/ha entre los valores de la biomasa aérea en cada corte y la biomasa simulada. El valor de EF fue de 0,9, señalado como muy bueno según los criterios de Krause *et al.* (2005) y Moriasi *et al.* (2007). El parámetro estadístico NRMSE permitió considerar la validación como adecuada (valor del 15%).

El índice de concordancia o de agregación de Willmott (d), que calcula el error relativo en las estimaciones del modelo validado, fue casi perfecto, acercándose al valor 1 (0,97). El modelo mostró sensibilidad entre los valores simulados de la biomasa acumulada en cada corte y los obtenidos en los ensayos a campo de la Red de INTA Rafaela.

Discusión

El objeto del presente trabajo fue utilizar un modelo capaz de representar el crecimiento de pasturas de alfalfa sujetas a diferentes condiciones ambientales y de manejo de la defoliación. En este sentido, AquaCrop es un modelo de gran funcionalidad para el cálculo del rendimiento de cultivos herbáceos, simulando la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo en función del volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de las precipitaciones y el aporte que pudiera hacer la napa freática (Stedutto *et al.*, 2009; Toumi *et al.*, 2016).

Para la generación y cálculo de las variables y parámetros de entrada al modelo, en el módulo cultivo, se utilizó la información disponible en la bibliografía, ya que no se disponía de datos de campo propios. Solo se pudo contar con el dato final de acumulación de MS en cada corte realizado en la Red (PO), que se contrastó con la PE del modelo. La integración de la producción

de MS con los datos reales de las variables climáticas, de suelo y de NF, generó una buena calibración del modelo.

Aunque las simulaciones presentaron buenos desempeños, al tomar el valor promedio entre materiales con diferencias significativas en la producción de la biomasa observada, los resultados podrían estar sesgados. No obstante, Ran *et al.* (2018), utilizando promedios para híbridos en maíz, indicaron que aunque el modelo produce algunas estimaciones inexactas, al usar los mismos parámetros para diferentes híbridos sin necesidad de calibración individual lo convierte en un modelo de amplia aplicación.

El impacto del cambio genético a lo largo de los años, sería otra variable a considerar a los efectos de mejorar los ajustes en el modelo, posiblemente el período de estudio pudo incidir en las diferencias entre PO y PE. En un estudio realizado por Martín y Coronel (2021), se analizó la tendencia evolutiva de las producciones anuales promedio en materiales disponibles comercialmente, desde 1972 hasta 2015. Se encontró que, durante el subperíodo de 2008 a 2015, hubo un coeficiente de variación del 20% en las producciones. Sin embargo, en la información recopilada por la Red, los valores de biomasa entre los cultivares ensayados en cada ciclo y año, se constató en general altas variaciones entre los materiales ensayados (47% coeficiente de variación, en 27 ciclos de producción, 2000-2017). Se observó que independiente del ciclo productivo, y de forma no consistente, se diferenciaban solo algunos cultivares más productivos, si bien en algunos ciclos no había diferencias entre todos los materiales.

Otro parámetro que se debe determinar es CC_{máx}, valor que se encuentra altamente relacionado con el índice de área foliar (IAF). Esta relación fue documentada por varios autores (Hsiao *et al.* 2009; Hsiao *et al.* 2012; Montoya Sevilla, 2013), quienes señalaron que cuando el IAF es mayor a 3 m² m⁻², los valores de CC_{máx} son superiores al 90%, y que cuando se ubican entre 4,5 a 5 m² m⁻², la CC_{máx} es del 95% o superior. La ecuación utilizada en el cálculo permitió estimar valores de CC_{máx} inferiores a los de estos autores, en el orden de 85% en los cortes de P-V y 65% en los de O-I.

La correcta simulación de la cobertura foliar es fundamental para la representación del modelo, porque afecta la tasa de transpiración y, en consecuencia, la acumulación de biomasa (Farahani *et al.*, 2009). Así, los ajustes que pudiesen ser realizados en ensayos a campo mostrarían más exactitud en el modelo; entre ellos, la densidad y la distancia entre líneas de siembra en alfalfa juegan un rol importante en las determinaciones del IAF, según el trabajo realizado por Mattera (2004). En cuanto al valor de densidad de plantas, el modelo los asocia con porcentajes de cobertura inicial. Si se cambia solo la densidad y permanece constante el resto de las variables “no conservativas”, los valores de PE se van modificando, con una variación que no supera el 4% al utilizar la máxima y la mínima densidad de alfalfa que el modelo permite (200 a 60 plantas m²).

Para cada simulación, se debe tener en cuenta que el modelo asume un crecimiento lineal hasta los 60 días, debido a que no puede explicar los complejos procesos ambientales (fundamentalmente las variaciones de temperatura y velocidad del viento) y fisiológicos que ocurren en la planta y sus impactos en la producción de biomasa (Guendouz *et al.*, 2014; Amiri, 2016). Para Steduto *et al.* (2009), en la simulación de la biomasa ese modelo lineal fue altamente contrastado con numerosas especies, entre las que alfalfa no estaría considerada. Pese a ello, se consideraron adecuados los parámetros del crecimiento lineal. Esta afirmación se fundamenta en la consideración del momento óptimo de defoliación aplicado según la metodología de corte de los ensayos de la Red, que se basa en criterios fenológicos (porcentaje de floración o altura del rebrote basal), sin realizar evaluaciones de biomasa intermedias durante un rebrote. Tal criterio se corresponde con el momento en que la cubierta vegetal alcanza las

máximas tasas de crecimiento promedio ([Parsons y Penning, 1988](#)), que coinciden con una intercepción de la radiación solar aproximada del 90-95%.

Respecto a las condiciones de la biomasa previa o inicial, [Berone et al. \(2017\)](#), calibrando el modelo McCall en alfalfas de GRI (grados de reposo invernal) 8-10, también debió considerarla. Este autor utilizó el valor de 200 kg de MS ha⁻¹ de biomasa verde (altura de corte = 5 cm). Al inicio del desarrollo del cultivo, el programa simula que la biomasa aérea presente condiciona la demanda de agua por parte de la alfalfa en esta etapa. Se realizaron varias pruebas para definir un valor de Bi, y se consideró 500 kg de MS ha⁻¹.

Para lograr una mayor robustez en el modelo, en especies que son defoliadas frecuentemente, es necesario valorar a campo el remanente del corte (cobertura de vegetación precedente o Bi). Este aspecto, aún no habilitado en el modelo de cortes secuenciados en el tiempo, sería importante ya que el efecto, según la estación del año, está relacionado con una mayor capacidad de intercepción y absorción de radiación, lo que afecta la acumulación de la biomasa forrajera del corte siguiente.

Como anteriormente fue comentado, otra variable a destacar es la humedad inicial del suelo, que puede referirse como capacidad de campo, punto de marchitez y fracción porcentual del total de agua disponible. En este trabajo, el estado hídrico inicial del suelo fue predicho comparando las precipitaciones (P) ocurridas 15 días previos al inicio de cada modelación con el valor promedio del período 2000-2018 para esos días. Los estados iniciales condicionan el paso diario de transpiración del cultivo. Así, el valor de Kc inicial será alto cuando el suelo se encuentre húmedo por excesos de P y será bajo cuando la superficie del suelo se encuentre seca por déficit de P. El modelo inicia el balance con esos valores de humedad y luego acompaña la evolución de la humedad retenida en relación a los eventos posteriores que humedezcan o no al perfil (P y/o napa freática o NF) en el período de corte que se considere.

Para concluir, los ajustes en la fase de calibración fueron adecuados comparados con los valores de los parámetros estadísticos utilizados por [Heng et al. \(2009\)](#), [Hsiao et al. \(2009\)](#) y [Raes et al. \(2011\)](#).

Los estadísticos obtenidos en la validación del modelo mostraron buenos ajustes entre las PO y PE, con valores que pueden considerarse aceptables en comparación con los obtenidos por otros autores en diversas validaciones del modelo para otros cultivos, como por ejemplo frijol (*Phaseolus vulgaris* L) ([Olivera et al., 1916](#)), soja (*Glycine max*) ([Morasi et al. 2007](#)), papa (*Solanum tuberosum*) ([Montoya Sevilla et al. 2016](#)), cebada (*Hordeum vulgare*) ([Araya et al., 2010](#)), avena (*Avena sativa*) y raigrás (*Lolium multiflorum*) ([Terán Cháves, 2015](#)), entre otros. Es de destacar el buen comportamiento del Modelo AquaCrop para estimar las biomásas aéreas acumuladas en alfalfa sujetas a distintas frecuencias de defoliación. Sin embargo, el modelo no puede distinguir el proceso de almacenamiento y re-movilización de asimilados hacia o desde la corona y raíces. De esta forma, considerando que la partición a raíces y corona aumenta hacia el final del verano ([Khaiti y Lemaire, 1992](#); [Brown et al., 2006](#)), es factible que el peso aéreo a fines del verano se vea reducido por una mayor partición de biomasa hacia órganos subterráneos, dando lugar comparativamente a una producción de biomasa sobrestimada en la estación otoñal.

Conclusiones

El modelo AquaCrop fue probado y validado por su capacidad para simular distintos parámetros del cultivo de alfalfa, entre ellos: cobertura de dosel verde, acumulación de biomasa y biomasa final en un ambiente templado. Los índices estadísticos del error cuadrático medio, la eficiencia del modelo, el índice de concordancia y el coeficiente de determinación (R^2) indicaron que

AquaCrop pudo simular la evolución estacional de la cobertura del dosel y la biomasa con un alto grado de precisión.

Se destaca la precisión para estimar las producciones en primavera y verano. Si bien la calibración fue efectiva en líneas generales, el modelo exhibió una tendencia a sobrestimar las producciones de otoño-invierno. Como explicación a esto último, postulamos que esto se debería a la imposibilidad del modelo para realizar una partición diferencial de las reservas que se sintetizan, que durante esas estaciones se direccionan predominantemente hacia la corona y raíz. No obstante, si se considerasen solo aquellos materiales más productivos y con mejor comportamiento genético, se podrían mejorar aún más los ajustes.

Los resultados de este estudio sugieren que AquaCrop podría usarse para predecir la biomasa aérea en alfalfa con un alto grado de confiabilidad en fechas de corte de diferentes estaciones de crecimiento. La simplicidad y robustez del modelo para estimar el crecimiento de la biomasa aérea en función del consumo de agua hace que se posicione como una herramienta útil para la especie.

Nota aclaratoria

Este artículo científico contiene parte de los resultados de la tesis doctoral de la Dra. Beatríz Martín, para optar al título de doctora en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, titulado “Estimación de la producción de forraje de *Medicago sativa* L. a partir de variables climáticas y edáficas; y desarrollo de un índice de valoración forrajero, en la región pampeana Argentina”. Año 2021.

Declaración de Autoría (CRedi)

BM: Investigación, Análisis formal, Redacción – borrador original, Curaduría de datos, Escritura – revisión y edición.

AC: Redacción – borrador original, Conceptualización, Metodología, Redacción – borrador original.

Disponibilidad de datos

Los datos experimentales utilizados en la presente investigación y la elaboración de este artículo se encuentran disponibles en el siguiente enlace: <https://doi.org/10.57715/UNR/LD3C10>

Referencias

ALLEN, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, B.; SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponible en: http://www.engr.scu.edu/~emaurer/classes/ceng140_watres/handouts/FAO_56_Evapotranspiration.pdf Acceso: febrero 2022.

AMIRI, E. (2016). Calibration and Testing of the Aquacrop Model for Rice under Water and Nitrogen Management. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 47(3): 387-403.

ARAYA, A.; HABTU, S.; HADGU, K.M.; KEBEDE, A.; DEJENE, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*), Agricultural Water Management, 97(11): 1838-1846.

ARAYA, A.; KISEKKA, I.; HOLMAN, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. 17pp. Irrig Sci, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

AROLFO, V. y ODORIZZI, A. (ed.). (2015). Avances en Alfalfa. Ensayos Territoriales. EEA Manfredi-INTA, Año 25 al 28.

BERONE, G. D.; DI NUCCI DE BEDENDO, E.; FERNANDEZ, H.; GASTALDI, L.; MATTERA, J.; SPADA, M. (2017). Calibración y validación de un modelo de crecimiento para alfalfa (*Medicago sativa* L.). RIA.

Revista Investigaciones Agropecuarias Disponible en <http://ria.inta.gov.ar/sites/default/files/trabajosenprensa/berone-castellano-8.pdf> (acceso: abril de 2022).

BONADEO, E.; HAMPP, E. R.; BONGIOVANNI, M.; MORENO, I. S.; ODORIZZI, A. (2006). Relationships between soil physical and chemical properties and alfalfa (*Medicago sativa* L.) roots in patched soils. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/237348935> Acceso: octubre 2022.

BROWN, H. E., MOOT, D. J.; TEIXEIRA, E. I. (2006). Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa* L) in a temperate climate. *European Journal of Agronomy* 25: 319-327.

BROWN, H. E., MOOT, D. J.; POLLOCK, K. M. (2005). Herbage production, persistence, nutritive characteristics and water use of perennial forages grown over 6 years on a Wakanui silt loam. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 48, 423-439.

BROWN, R. H.; PEARCE, R. B.; WOLF, D. D.; BLASER, R. E. (1972). Energy accumulation and utilization. In Hanson, C.H. (Ed.) *Alfalfa Science and Technology*, ASA, Madison, WI, USA, 143-166.

COLLINO, D. J.; DANDANELLI, J. L.; DE LUCA, M. J.; RACCA, R. W. (2005). Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.) *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.45, p.383-390.

COLLINO, D.; DARDANELLI, J. L.; DE LUCA, M. (2007). Uso del agua y la radiación para la producción de forraje. En *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. Basigalup D. (Ed.) *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. E.E.A. Manfredi – INTA. Córdoba, Argentina. pp. 45-65.

DI NUCCI DE BEDENDO, E.; VALENTINUZ, O. R.; FIRPO, M. V.; MARTÍNEZ, M. del H. (2009). Análisis de crecimiento de alfalfa en condiciones potenciales. Estación Experimental Agropecuaria Disponible en: Paraná.inta.gov.ar/.../analisis-de-crecimiento-de-alfalfa-en-condiciones-potencial Acceso: diciembre 2023.

DÍAZ-ZORITA, M. (2008). Fertilización de pasturas mixtas templadas, p. 332-345. En Melgar, R. y M. Díaz-Zorita (eds.). *Fertilización de Cultivos y Pasturas*. 2da. ed. Editorial Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.

DOORENBOS, J. Y PRUITT, W. O. (1977). Guidelines for prediction crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, n° 24, 144-156.

EMBERSON, L. D.; WIESER, G.; ASHMORE, M. R. (2000). Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: comparison with field data. *Environmental Pollution*. Volume 109, Issue 3, September 2000, 393-402.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. (2009). Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*, 101(3): 469-476.

FICK, G.W., HOLT, D. A.; LUGG, D. G. (1988). Environmental physiology and crop growth. En: Hanson, A. A.; D. K. Barnes; R. R. Hill Jr. (Eds.). *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. American Society of Agronomy, Madison, WI, Agronomy Series 29.163-194 pp.

FRENCH, B. K. y LEGG, B. J. (1979). Rothamsted irrigation 1964–76. *Journal of Agricultural Science, U.K.* 92, 15 – 37. Disponible en <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/> Acceso: octubre 2022.

GEERTS, S.; RAES, D.; GARCIA, M.; MIRANDA, R.; CUSICANQUI, J. A.; TABOADA, C.; MENDOZA, J.; HUANCA, R.; MAMANI, A.; CONDORI, O. Y MAMANI, J. (2009). Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agron. J.* 101:499-508.

GREGORY, P. J. (2006). *Plant Roots: Growth, Activity and Interaction with Soils*. Blackwell Publishing, Oxford, 308p.

- GREGORY, P. J.; BENGOUGH, A. G.; GRINEV, D.; SCHMIDT, S.; THOMAS, W. B. T.; WOJCIECHOWSKI, T.; YOUNG, I. M. (2009). Root phenomics of crops: opportunities and challenges. *Funct. Plant Biol.* 36: 922-929.
- GRISMER, M. E. (2001). Regional alfalfa yield, ETc, and water value in Western States. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127: 131-139.
- GUENDOOUZ, A.; HAFSI, M.; MOUMENI, L.; KHEBBAT, Z.; ACHIRI, A. (2014). Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(2): 168–176.
- GUZMÁN, C.; SPADA, M. C.; MOMBELLI, J. C. (2007). Eficiencia del uso de la radiación de cultivares de alfalfa de distinto grado de reposo en Córdoba, Argentina. En: APPA; ALPA (Cusco, Perú). Sitio Argentino de Producción Animal. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/83-Guzman-radiacion.pdf Acceso: noviembre 2022.
- HEICHEL, G. H.; DELANEG, R. H.; CRALLE, H. T. (1988). Carbono asimilación, partición y utilización. En: Hanson, A.A., Barnes, D.K y Hill, R.R. (ed) *Alfalfa an alfalfa improvement*. Agronomy Monograph N° 29, CSSA/SSSA, Madison, Wi,(6), p 196-227.
- HENG, L. K., HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron. J.* 101(3): 488-498
- HIJANO, E. H. y BASIGALUP, D. H. (1995). El cultivo de la alfalfa en la República Argentina. En *La alfalfa en Argentina*. Editores: Hijano-Navarro. Subprograma Alfalfa INTA C. R. Cuyo-Marzo 1994.
- HSIAO, T. C. (1973). Plant responses to water stress. *Annual review of plant physiology*, 24(1), 519-570.
- 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 alfalfa. *Agronomy Journal*, vol. 101 (3): 448-459. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300060039x> Acceso: diciembre 2022.
- HSIAO, T. C.; FERERES, E.; STEDUTO, P.; RAES, D. (2012). AquaCrop parameterization, calibration, and validation guide. In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E and Raes D (eds) *Crop Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. FAO, Rome. 70-87.
- JOHNSON, I.R., CHAPMAN, D.F., PARSONS, A., ECKARD, R.; FULKERSON, W (2003). DairyMod: a biophysical simulation model of the Australian dairy system. Australian Farming Systems Conference. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/259892592> Acceso: febrero 2023.
- JONES, J. W., MAKOWSKI, D.; WALLACH, D. (2006). Introduction to Section II. In: Wallach, D., Makowski, D. & Jones, J.W., Eds. *Working with Dynamic Crop Models: evaluation, analysis, parameterization and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2006, p. 11-54.
- KARUNARATNE, A. S.; AZAM-ALI, S. N.; IZZI, G.; STEDUTO, P. (2011). Calibration and validation of FAO-AquaCrop model for irrigated and water deficient bambara groundnut. *Experimental Agriculture*, 47, 509–527.
- KHAITI, M. y LEMAIRE, G. (1992). Dynamics of shoot and root growth of lucerne after seeding and after cutting. *Eur. J. Agron.* 1 (4): 241–247.
- KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97.
- LINDENMAYER, R. B.; HANSEN, N. C.; BRUMMER, J.; PRITCHETT, J. G. (2011). Deficit irrigation of alfalfa for water-savings in the Great Plains and Intermountain West: a review and analysis of the literature. *Agron. J.* 103:45-50

- MARTÍN, B. (2021). Estimación de la producción de forraje de *Medicago sativa* L. a partir de variables climáticas y edáficas; y desarrollo de un índice de valoración forrajero, en la región pampeana argentina. 170 p. Disponible en <https://rephip.unr.edu.ar/xmlui/handle/2133/11639> Acceso: diciembre de 2022.
- MATTERA, J. (2004). Efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes del rendimiento de forraje y el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Producción Vegetal. Disponible en <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2011matterajuan.pdf> Acceso: febrero 2023.
- MATTERA, J.; ROMERO, L.; CUATRIN, A.; GRIMOLDI, A. A. (2009). Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa. Revista Argentina de Producción Animal, Vol 29 (2): 131-140.
- MONTOYA SEVILLA, F. (2013). Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral disponible en <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/3815> Acceso: abril 2018.
- MONTOYA SEVILLA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J. F.; CÓRCOLES, J. I.; DOMÍNGUEZ, A. (2016). Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under different irrigation conditions, Agricultural Water Management, 164, Part 2: 267-280.
- MORASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE, 50(3): 885-900.
- MOSCONI, F.; PRIANO, J.; HEIN, N.; MOSCATELLI, G.; SALAZAR, J.; GUTIÉRREZ, T.; CÁCERES, L. (1981). Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe. Tomo I. Ed. INTA-MAG. Santa Fe. Argentina. 248 pp.
- OLIVERA, N. T.; MANRIQUE, O. B.; MASJUAN, Y. G.; GUERRERO ALEGA, A. M. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 25, No.3: 23-30.
- PANIGATTI, J.L.; PIÑEIRO, A.; MOSCONI, F.P. (1971). Patches in crops of the Central zone of Santa Fe. Revista de Investigaciones Agropecuarias 8: 141-154.
- PARSONS, J. y PENNING, P. D. (1988). The effect of the duration of regrowth on photosynthesis, leaf death and the average rate of growth in a rotationally grazed sward. Grass and Forage Science. Vol 43, 1: 15-27.
- RACCA, R.; COLLINO, D.; DARDANELLI, J., BASIGALUP, D.; GONZÁLEZ, N.; BREZONI, E.; HEIN, N.; BALZARINI, M. (2001). Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de alfalfa en la región pampeana. Ediciones INTA. 56p.
- RAN, H.; KANG, S.; LI, F.; DU, T.; TONG, L.; LI, S.; DING, R.; ZHANG, X. (2018). Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. Agricultural Water Management, v.203: 438-450.
- RAES, D.; STEDUTO, P. HSIAO, T. C.; FERERES, E. (2009). AquaCrop. The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description Agron. Agronomy Journal, vol. 101, No. 3. Software Description. Agronomy Journal, vol. 101, No. 3: 438-447.
- RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. (2017). AquaCrop version 6.0 reference manual. Rome: FAO, 2017. Disponible en <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquacrop/en/> Acceso: marzo de 2018.
- SEVILLA, G. (2004). Manejo del pastoreo en alfalfa; acumulación y eficiencia de cosecha del forraje. Revista Argentina de Producción Animal 24(1): 19.

SPADA, M. del C. (2000). Avances en Alfalfa. Ensayos Territoriales. EEA Manfredi-INTA, Año 10 - N° 10, 64 p. 36.

STEDUTO P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25:189-207.

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. *Agronomy Journal*, 101-3: 426- 437.

TERÁN CHAVES, C. A. (2015). Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la Sabana de Bogotá (Colombia). Tesis Doctoral. Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España. 297. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=104032> Acceso: enero 2023.

THOMAS, H. y HOWARTH, C. J. (2000). Five ways to stay green. *Journal of Experimental Botany* 51:329-337.

TOUMI, J.; ER-RAKI, S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agric. Water Manage* 163:219-235.

WHALLEY, W. R.; LEEDS-HARRISON, P. B.; CLARK, L. J.; GOWING, D. J. G. (2005). Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84: 18-27.

Martín, B., y Coronel, A. (2023). Una evaluación del modelo AquaCrop para simular la biomasa acumulada en alfalfa a partir de rendimientos históricos de Rafaela, Santa Fe. *Ciencias Agronómicas*, (42), e037. <https://doi.org/10.35305/agro42.e037>

Copyright (c) 2023 B. Martín y A. Coronel



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)
