

Evaluación de un lote de maíz bajo riego y siembra variable con el modelo AquaCrop en Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, C. Miranda y G. Díaz

RESUMEN

Los modelos de cultivo constituyen herramientas apropiadas para estudiar la variabilidad espacial y analizar las causas determinantes del comportamiento productivo de un lote. El modelo AquaCrop V4.0, que emplea la cobertura del cultivo (CC) como parámetro central para representar el crecimiento y desarrollo vegetal, se utilizó a fin de estimar la productividad e inferir las causas determinantes de las diferencias de rendimiento en un lote de maíz (*Zea mays* L.) bajo riego sembrado a tasa variable en Córdoba, Argentina. Por medio de fotografías digitales se obtuvieron datos de CC para representar la evolución del cultivo durante el ciclo que se extendió del 4/10/2013 (siembra) al 24/4/2014 (cosecha). Además, en seis sectores del lote establecidos de acuerdo a la densidad de siembra y la distancia a la cabecera de riego, se registró periódicamente la biomasa aérea y el contenido de agua del suelo y, a la cosecha, el rendimiento de grano. AquaCrop se aplicó bajo dos modalidades: potencial y real. Mientras las determinaciones a tasa potencial permiten convalidar un valor de productividad del agua (WP*) característico para maíz de 34,4 g m⁻² y establecer la lámina de riego total requerida para suprimir el estrés hídrico (entre 411 y 433 mm), bajo condiciones reales el agua de riego se ajustó con un valor de eficiencia particular para cada sector del lote. El análisis estadístico de la relación entre los valores observados y estimados por AquaCrop arrojó resultados muy aceptables en el caso de CC y la producción de materia seca (Coeficiente de determinación, Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe e Índice de Willmott $\geq 0,81$). Si bien estos indicadores expresan mayor dispersión para el contenido de agua del suelo en cada sector por separado, los resultados en conjunto son estadísticamente aceptables, al igual que cuando se evaluó el rendimiento de granos. Hacia el norte del lote la productividad resultó marcadamente inferior que en el sur. A los efectos de establecer de manera integral relaciones consistentes entre los valores observados y estimados de CC, materia seca, contenido de agua del suelo y rendimiento de grano, la simulación del riego en AquaCrop debió considerar una eficiencia de aplicación de 40% en los sectores ubicados al norte del lote y mayor de 60 % en los del sur.

Palabras Clave: agricultura de precisión, productividad del agua, cobertura del cultivo, eficiencia de riego

de la Casa, A.; G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, C. Miranda and G. Díaz, 2016. Irrigated and variable planting corn field assessment with aquacrop model in Córdoba, Argentina. RADA VII:

SUMMARY

Crop models are suitable tools for studying spatial variability and analyzing those factors that are determinants of the productive performance within a field. The AquaCrop V4.0 model, which uses crop cover (CC) as a central parameter to represent the plant growth and development, was used to estimate productivity and infer the determinants of performance differences in a field of corn (*Zea mays* L.) crop planted at variable rates in Cordoba, Argentina. The CC data were obtained through digital photographs to represent the crop evolution during the crop cycle from 04/10/2013 (seeding) to 24/04/2014 (harvest). Moreover, in 6 sectors of the field determined according to planting density and distance from the head of irrigation, biomass and water content of the soil was recorded periodically and also the corn yield at harvest. AquaCrop was applied under two modalities: potential and actual. While the potential rate allowed to validate a water productivity (WP*) characteristic for corn of 34.4 g m⁻² and set the total irrigation requirement to remove water stress (between 411 and 433 mm), under real conditions the irrigation of water was adjusted with a particular efficiency value for each sector in the field. Statistical analysis of the relationship between observed and estimated values with AquaCrop yielded very acceptable results in the case of CC and dry matter production (Coefficient of determination, Efficiency Nash-Sutcliffe model and Willmott index ≥ 0.81). Productivity to the north of the field was markedly lower than in the south. Looking for establishing in a comprehensive manner consistent relationships between observed and estimated values of CC, dry matter, soil water content and grain yield, irrigation simulation of AquaCrop should consider an application efficiency of 40% in the north sectors of the field and over 60% in the south.

Keywords: precision agriculture, water productivity, cover crop, irrigation efficiency

A. de la Casa, G. Ovando y G. Díaz: Agrometeorología. L. Bressanini: Agrotecnia. J. Martínez: Física. Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA-UNC), Córdoba CP: 5000, Argentina. C. Miranda: Establecimiento Las Delicias. Correspondencia a: delacasa@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La agricultura dispone de un caudal cada vez mayor de información respecto a la variabilidad espacial del suelo y del comportamiento productivo de los cultivos a partir de los mapas de rendimiento, análisis de suelo y datos que provee la teledetección (Moran *et al.*, 1997; Oliver *et al.*, 2010). Este conocimiento debidamente sistematizado, sumado al desarrollo de la mecanización, la electrónica y la informática, han dado lugar a la agricultura sitio-específica que consiste en la aplicación de principios y tecnología destinada a manejar la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola, con el propósito de mejorar la productividad de los cultivos y preservar la calidad ambiental (Pierce & Novak, 1999).

El estudio de la variabilidad espacial y las causas determinantes del comportamiento productivo

de un lote puede ser realizado con la ayuda de los modelos de cultivo (Batchelor *et al.*, 2002; Oliver *et al.*, 2010). Estas herramientas informáticas permiten cuantificar el rendimiento potencial, como así también evaluar el incremento de rendimiento y los beneficios financieros que produce una eventual decisión de manejo, relacionada con el aprovechamiento de los sectores más productivos del lote o la corrección de aquellos que presentan alguna limitación.

El modelo AquaCrop es una evolución del método FAO para estimar el rendimiento de los cultivos que ha mejorado su base conceptual en los siguientes aspectos (Steduto *et al.*, 2009): (i) separa la evapotranspiración (ET) entre la transpiración del cultivo (Tr) y la evaporación del suelo (E), (ii) considera un modelo simple de crecimiento y senescencia de la cobertura del follaje (CC) como base para estimar Tr, (iii) determina el rendimiento (Y) en función de la biomasa (B) y del índice de

cosecha (HI), y (iv) considera el efecto del estrés hídrico en distintas etapas y procesos del cultivo: crecimiento, senescencia, Tr, e HI. La función que simula el crecimiento en AquaCrop es:

$$B = WP^* \times \sum Tr$$

donde WP* es la productividad del agua (cociente entre la biomasa por unidad de superficie y la unidad relativa de transpiración acumulada), que tiende a ser constante bajo distintas condiciones climáticas y de manejo (Steduto *et al.*, 2007). De acuerdo a resultados obtenidos en otras regiones y bajo distintas condiciones de producción, WP* presenta para maíz valores superiores a 30 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009).

Desde la aparición de AquaCrop en 2009 (Steduto *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009), el modelo ha sido usado extensivamente para analizar el comportamiento productivo de distintos cultivos y bajo condiciones de manejo muy diversas. Abedinpour *et al.* (2012) lo aplicaron en maíz para evaluar tres niveles de fertilización nitrogenada y cuatro de riego; Stricevic *et al.* (2011) lo usaron en Serbia bajo dos escenarios (en secano y bajo riego, con suministro de nutrientes adecuado) para los cultivos de maíz, remolacha y girasol; también para maíz, Flores-Gallardo *et al.* (2013) lo emplearon al norte de Sinaloa, México, para evaluar tres condiciones de disponibilidad hídrica: riego total (RT) y riego deficitario (80 % y 60 % respecto a RT). Andarzian *et al.* (2011) evaluaron la producción de trigo en Irán bajo distintos manejos del agua de riego; Mkhabela & Bullock (2012) lo adaptaron para simular el rendimiento de trigo y el contenido de agua del suelo en Canadá; etc.

AquaCrop emplea CC para modular la interacción entre la planta y la atmósfera y, en base a ella, estructura la dinámica de crecimiento, consumo de agua y productividad del cultivo (Raes *et al.*, 2009). Por otra parte, los estudios demuestran que la CC constituye un parámetro biofísico que se puede obtener fácilmente de medios digitales, a través del procesamiento de imágenes de cámaras tanto convencionales como modificadas (Gitelson, 2004; Li *et al.*, 2010; de la Casa *et al.*, 2013b).

La agricultura de precisión (AP) integra un conjunto de tecnologías destinadas a optimizar la producción en un lote a partir del manejo localizado de cada sector. El monitoreo remoto constituye una tecnología clave para la AP ya que permite evaluar y seguir a tiempo real la condición de los cultivos (Moran *et al.*, 1997). Sin embargo, las imágenes que proveen los sistemas comerciales de alta resolución espacial a partir de aviones no tripulados o de plataformas satelitales suelen resultar poco accesibles

por su costo (Hunt *et al.*, 2010) y, si bien se han realizado muchos avances en la aplicación de los sensores remotos para el manejo sitio específico, aún subsisten baches en el conocimiento que es necesario subsanar (Mulla, 2013).

Reconocida la influencia fundamental del agua en la productividad vegetal, es indudable que una parte importante de la variabilidad en los mapas de rendimiento es producida por la variación espacial de propiedades edáficas, topográficas y de la vegetación que condicionan el contenido de agua del suelo (Timlin *et al.*, 2001; Batchelor *et al.*, 2002; Kitchen *et al.*, 2003). Si bien el riego asegura en tiempo y forma el abastecimiento de agua para la agricultura, su disponibilidad efectiva para los cultivos en cada lugar del lote puede estar limitada, además de los factores anteriores, por razones de orden operativo y, de manera particular, cuando la distribución del agua de riego se realiza por surcos.

La integración del recurso informático que provee AquaCrop con diversos medios digitales apropiados para obtener información espectral de la vegetación y, en particular para determinar CC, no sólo permite estimar detalladamente el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, sino que también constituye una plataforma analítica para evaluar el impacto y eficiencia de distintas prácticas agronómicas en cada sector del lote (Batchelor *et al.*, 2002; de la Casa *et al.*, 2013a). De esta forma, resulta viable analizar el comportamiento de los cultivos a una escala compatible con la que requiere la AP para identificar a los factores responsables que imponen restricciones sobre la productividad.

A partir de datos de cobertura del cultivo (CC) de maíz observados a campo durante el ciclo se evaluó la capacidad predictiva del modelo AquaCrop para estimar la biomasa producida en base a la productividad del uso del agua, analizando la brecha de rendimiento del cultivo de maíz bajo riego en un contexto de agricultura de precisión en Córdoba, Argentina. Asimismo, a fin de identificar y analizar los principales factores responsables de las diferencias productivas en el lote y explicar las causas probables del comportamiento monitoreado, la herramienta informática se empleó haciendo el ajuste de la lámina de riego de manera particular en cada sector.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó sobre un cultivo de maíz (*Zea mays* L.), con la variedad MK 960 - TD, TG de SINGENTA. Las mediciones se realizaron entre el 4/10/2013 (siembra) y el 2/04/2014 (madurez fisiológica), en un lote de 45 ha ubicado al sur de

la ciudad de Córdoba (31°33' S, 64°05' O, 400 m/ snm) que se cosechó el 24/4/2014. El suelo del lote es un Haplustol éntico, serie Manfredi, cuyo perfil presenta tres horizontes de textura franco y franco-limoso (Dardanelli *et al.*, 1997), con las características que presenta la Tabla 1. Esta información se utilizó para crear el archivo de suelo que AquaCrop necesita para la simulación.

En base a un mapa de rendimiento de un cultivo de soja precedente, se identificó en el lote una franja de mayor productividad real hacia el sur (S), donde la densidad de siembra se ajustó a 10 pl m⁻², y otra hacia el norte (N), donde la densidad se estableció con 8 pl m⁻². En cada una de las franjas se dispusieron 3 áreas de muestreo: en la cabecera de riego (O), en el centro (C) y en el final o

Tabla 1. Propiedades edáficas utilizadas para representar el suelo del lote al sur de la ciudad de Córdoba, Argentina (Dardanelli *et al.*, 1997).

Horizonte	Textura	Profundidad (m)	Saturación	CC (m ³ m ⁻³)	PMP	ADT (mm m ⁻¹)	Ksat (mm día ⁻¹)	tau
A	Franco	0-0,23	0,46	0,327	0,145	182	250	0,60
AC	Franco-limoso	0,24-0,46	0,46	0,330	0,130	200	150	0,50
C	Limoso	>0,47	0,43	0,270	0,115	155	50	0,34

Referencias. CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitamiento permanente; ADT: Agua disponible total; Ksat: Coeficiente de saturación; tau: Coeficiente de drenaje.

cola del surco (E), estableciendo en total 6 sectores (SO, SC, SE, NO, NC y NE) designados por su posición geográfica en el lote.

Los datos meteorológicos utilizados (temperatura máxima y mínima, precipitación y evapotranspiración de referencia calculada con el método de Penman-Monteith) proceden de una estación automática que se encuentra en la proximidad del lote. La información sobre la variación de la concentración atmosférica de CO₂ se adoptó de los registros anuales del archivo MaunaLoa.CO2 original (Etheridge *et al.*, 1996), que es utilizado por defecto en la ejecución de AquaCrop.

En base a la información de un análisis de suelo el cultivo recibió a la siembra 150 kg ha⁻¹ de urea y 150 kg ha⁻¹ de sulfato de amonio. La fertilización se completó diez días después de la siembra con 50 kg ha⁻¹ de urea adicionales. De acuerdo con esto, la simulación no consideró mermas productivas por deficiencia de nutrientes. Por su parte, se aplicaron cinco riegos por surco de 80 mm cada uno, tres antes (los días 13/11/2013, 7/12/2013 y 18/12/2013) y dos posteriores (los días 4/01/2014 y 19/01/2014) a floración. La dinámica de la reposición y consumo de agua de cada sector del lote se simuló siguiendo dos modalidades. La primera simulación asumió el carácter de potencial, en base a un modo de ejecución del modelo que realiza la reposición automática del agua para mantener el contenido del suelo siempre por encima de 50% del agua útil. Conocido el valor de la evapotranspiración máxima, es posible de esta forma estimar el agua de riego necesaria para mantener el cultivo sin restricciones de agua. Bajo esta modalidad, la CC y la biomasa aérea fueron las variables utiliza-

das para calibrar la estimación en cada sector. La segunda simulación, para representar la condición real del lote, se ejecutó modificando el archivo de riego de cada sector de acuerdo a un valor de eficiencia ajustado por prueba y error. En este caso, además de CC y la biomasa, la humedad del suelo observada en el perfil sirvió como información de referencia para ajustar la simulación.

Con una frecuencia media de 15 días se tomaron 12 fotografías verticales en cada sector de muestreo con una cámara digital modificada para producir registros de NDVI. Las imágenes se obtuvieron manteniendo la cámara a una altura constante de 2,5 m sobre el cultivo a lo largo del ciclo. La CC se calculó con un procedimiento de análisis digital que clasifica cada píxel como vegetación o suelo de acuerdo al valor de NDVI (de la Casa *et al.*, 2013b). La CC que estima AquaCrop se obtuvo modificando los coeficientes CC₀; tamaño inicial del canopeo (en t = 0) en base a la densidad de siembra observada; CCx: cobertura máxima en condiciones óptimas de crecimiento; CGC: coeficiente de crecimiento del canopeo; CDC: coeficiente de declinación del canopeo, hasta producir la función de ajuste entre observados y estimados similar a la recta identidad.

En cada fecha de muestreo se determinó la densidad de plantas contando los ejemplares de dos filas contiguas de 5 m de largo, y se extrajo la parte aérea de dos de ellas para obtener la materia seca. La biomasa por unidad de superficie se calculó de acuerdo a la población de plantas de cada sector. Además, en cada sector se registró el contenido de humedad del suelo con el método gravimétrico, haciendo un sondeo del perfil a cinco profundidades: 0,1; 0,3; 0,7; 0,9 y 1,1 m. Estas mediciones se

integraron a los efectos de obtener el contenido de agua del perfil compatible con el requerimiento del modelo. La determinación del contenido volumétrico de agua que se realizó dos días después de la siembra se utilizó para elaborar los archivos de la humedad inicial de cada sector.

Por su parte, para estimar la biomasa de maíz AquaCrop empleó un valor de Productividad del agua (WP*) de 33,7 g m⁻² (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009) que, ajustado por un coeficiente de corrección de acuerdo a la concentración atmosférica de CO₂ en 2013 (Steduto *et al.*, 2007), corresponde a una tasa de 34,4 g m⁻².

El procedimiento de análisis se realizó principalmente por correlación y regresión entre los valores observados de CC, biomasa aérea y contenido de agua del suelo y las respectivas estimaciones de AquaCrop en cada sector. A tal efecto se emplearon, adoptando los mismos indicadores que utiliza AquaCrop, diferentes estadísticos para evaluar el desempeño del modelo que incluyen el coeficiente de determinación, la raíz cuadrada del error cuadrático medio, el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (1970) y el índice de concordancia de Willmott (1981).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Evaluación de la productividad del agua en maíz bajo condiciones potenciales

Los coeficientes de desarrollo del canopeo bajo condiciones potenciales, que se obtuvieron por prueba y error considerando la diferente densidad de siembra de cada sector, se presentan en la Tabla 2. La relación entre la cobertura observada y estimada por AquaCrop presenta funciones de ajuste lineal en todos los sectores analizados que no difieren estadísticamente de la función identidad, el

coeficiente de correlación es igual o superior a 0,98, la raíz cuadrada del error cuadrático medio no supera 7,8% y el índice de concordancia de Willmott se aproxima a 1 en todos los casos.

La Figura 1 muestra la variación de la cobertura del cultivo de maíz en los sectores SO y NO del lote. Los puntos corresponden al valor de CC observado a partir de las fotografías digitales, en tanto el trazo con líneas muestra las estimaciones de AquaCrop para las condiciones meteorológicas, edáficas y de manejo del lote monitoreado en ausencia de restricciones de agua. Estas curvas describen de manera muy estrecha la variación observada, como se pone de manifiesto a partir de los índices estadísticos de la Tabla 2, en tanto un análisis comparativo expone diferencias marcadas entre ambos sectores a partir de los 80 días después de la siembra, que acontece próximo a la floración, con una declinación de CC más rápida en los sectores ubicados al norte del lote.

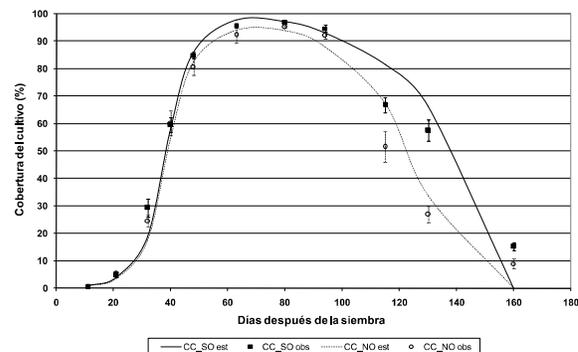


Figura 1. Variación de la cobertura observada (+/- 1 desvío estándar) y estimada por AquaCrop a partir de los coeficientes de desarrollo de la cobertura que muestra la Tabla 2, de acuerdo a los días después de la siembra en los sectores SO y NO del lote de maíz durante el ciclo 2013-14 en Córdoba, Argentina.

La Figura 2 presenta los valores de biomasa

Tabla 2. Coeficientes del modelo de desarrollo de la cobertura de maíz que utiliza AquaCrop y coeficientes de regresión (a: ordenada al origen; b: pendiente), coeficiente de determinación (R²), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e índice de concordancia de Willmott (d) para la relación entre los valores observados y estimados de cobertura en los diferentes sectores del lote en Córdoba, Argentina, durante el ciclo de maíz 2013-14.

Sector	Densidad (pl m ⁻²)	CC ₀ (%)	CCx	CGC (% d ⁻¹)	CDC	a	b	R ²	RMSE (%)	EF	d
SO	9,4	0,47	100	14,3	3,4	6,2	0,89	0,97	7,7	0,95	0,99
SC	9,6	0,48	100	14,3	3,4	6,4	0,91	0,97	7,3	0,96	0,99
SE	9,6	0,48	98	13,8	3,5	6,8	0,91	0,97	7,6	0,96	0,99
NO	8,4	0,42	96	14,5	4,5	2,8	0,95	0,97	6,7	0,96	0,99
NC	8,0	0,40	96	14,6	4,6	1,9	0,95	0,96	7,1	0,96	0,99
NE	8,4	0,42	95	15,0	4,0	4,0	0,90	0,96	7,7	0,95	0,99

Referencias. CC₀: tamaño inicial del canopeo (en t = 0) estimado de acuerdo a la densidad de plantas; CCx: cobertura máxima en condiciones óptimas de crecimiento; CGC: coeficiente de crecimiento del canopeo; CDC: coeficiente de declinación del canopeo.

aérea de maíz observada y las estimaciones de AquaCrop con la CC ajustada para cada sector del lote y considerando la ausencia de limitaciones por agua, nutrientes o salinidad. En general, se aprecia que los valores de biomasa observada son sistemáticamente inferiores a las estimaciones del modelo para un valor de WP* de 34,4 g m⁻². La productividad del agua en el sector SE, no obstante, alcanza un valor muy próximo al que define el modelo de carácter potencial, de modo que este parámetro conservativo se puede considerar inicialmente adecuado para representar la eficiencia del uso del agua y convalidar el valor propuesto por Hsiao *et al.* (2009), que analizaron la estabilidad de los parámetros del modelo en distintos cultivos de maíz, y por Heng *et al.* (2009), quienes lo validaron bajo riego y en secano. A partir de relaciones lineales de carácter significativas ($P < 0,01$) en todos los casos, los resultados de la Figura 2 muestran que la productividad de biomasa observada a campo durante el ciclo 2013-14 es menor a la que estima AquaCrop, y pone en evidencia la ocurrencia de factores limitantes sobre la productividad, con una brecha productiva particularmente más notable en los sectores del norte donde ocurre una marcada disminución de la producción de materia seca, con pendientes muy similares entre sí entre 0,65 y 0,67.

Habiendo convalidado la adecuación del valor de WP* que se utiliza para estimar la producción de biomasa, se deduce que las condiciones productivas en el sector norte del lote, ya sea anteriores o preexistentes como las que se presentaron durante 2013-14, resultaron restrictivas para que el cultivo exprese su potencial. La diferencia productiva entre los sectores norte y sur ya se había expresado en los rendimientos de un cultivo de soja previo, de modo que estos resultados confirman la diferente aptitud territorial del lote y avalan la implementación de un manejo localizado. La información sobre el uso del agua que AquaCrop estima asumiendo una reposición ilimitada, se presenta en la Tabla 3, alcanzando valores entre 411 y 433 mm de acuerdo al sector. De este modo, la aplicación de una dotación de agua total de 400 mm en cinco riegos se aproxima en buena medida a los requerimientos netos del cultivo de maíz durante el ciclo 2013-14. Las láminas establecidas son similares a las que Flores-Gallardo *et al.* (2013) determinaron con AquaCrop para maíz en Sinaloa, México, cuando aplican 80% del agua respecto al tratamiento de riego sin limitación. Por su parte, estas láminas de riego también están comprendidas por las aplicadas por Heng *et al.* (2009) para validar el modelo AquaCrop en maíz bajo diferentes

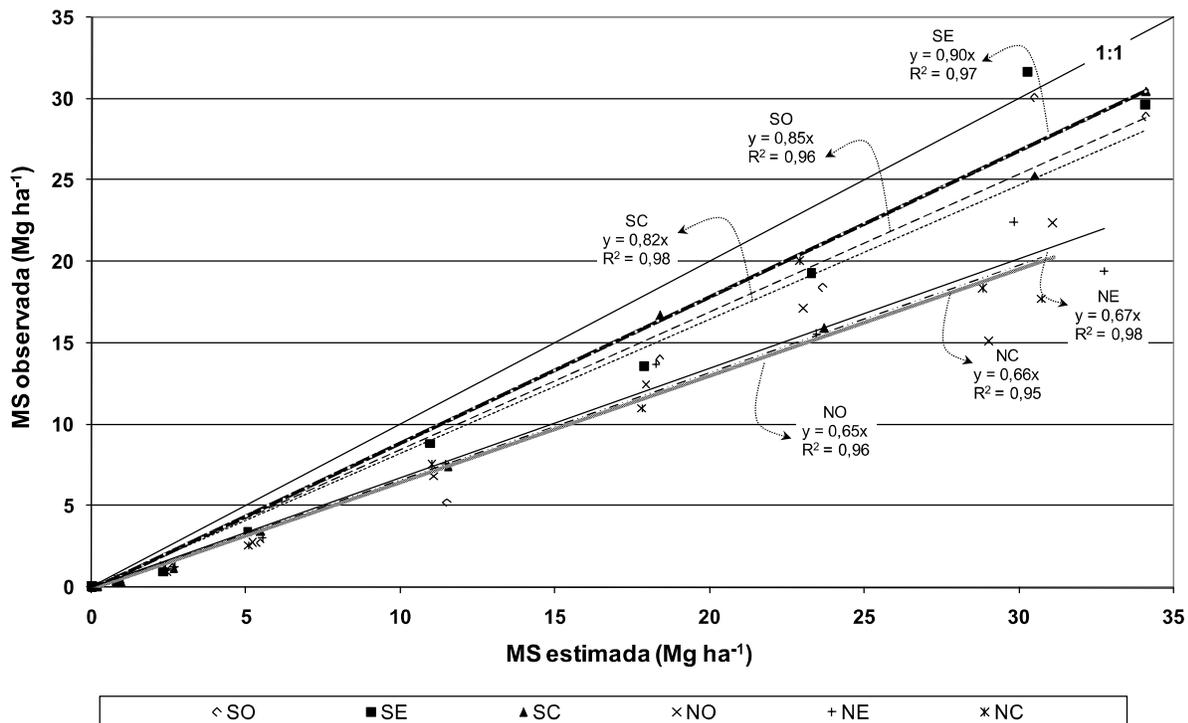


Figura 2. Relación entre la materia seca (MS) observada en distintos sectores del lote de maíz próximo a la ciudad de Córdoba, Argentina y los valores estimados por AquaCrop con una Productividad del agua (WP*) de 34,4 g m⁻².

Tabla 3. Estimación del requerimiento neto de riego, del agua evaporada (Ev) y transpirada (T) por el cultivo de maíz en los distintos sectores del lote al sur de la ciudad de Córdoba en 2013-14.

Sector	Requerimiento neto de riego	Agua aplicada total (mm)	Ev	T	Eficiencia de aplicación %
SO	418,4	400	114,4	566,4	60
SE	424,2	400	117,2	569,7	90
SC	422,1	400	114,9	566,8	60
NO	411,3	400	137,6	508,7	40
NE	422,3	400	131,9	535,5	40
NC	432,7	400	139,6	503,3	40

condiciones climáticas.

Sin embargo, cualquier valor de eficiencia de riego que se considere representa un aumento de la diferencia entre el agua requerida y la aplicada, y pone de manifiesto que el agua disponible resultó insuficiente para mantener el crecimiento a tasa potencial. Además, si bien los valores de la tabla expresan un requerimiento de agua relativamente uniforme en el lote, la menor producción de biomasa registrada en los sectores del norte significa que la eficiencia de aplicación allí debió ser en principio más reducida.

b. Evaluación bajo condiciones reales

A partir del calendario y las láminas de riego que se aplicaron al cultivo durante el ciclo, el análisis se completa considerando distintos valores de eficiencia de aplicación y distribución del agua para cada uno de los sectores del lote, cuyos montos se establecieron por prueba y error comparando la condición del cultivo observada a campo con las estimaciones que produce AquaCrop. De esta forma, conjuntamente con la CC y la biomasa aérea, cuya evolución temporal se muestra en las Figuras 3 y 4, respectivamente, el contenido de agua del perfil se incorpora a la evaluación a modo de variable independiente y ligada directamente con la dinámica del agua (Figura 5). Los resultados del análisis estadístico para la relación entre valores observados y estimados, utilizando distintos indicadores del ajuste alcanzado, se presentan en la Tabla 4.

En tanto los indicadores estadísticos expresan una marcada correspondencia entre los valores observados y estimados de CC (Tabla 4), su variación a lo largo del ciclo de maíz muestra diferencias entre los sectores, siendo la CC de los sectores ubicados al norte sensiblemente menores que los del sur. Si bien la diferencia queda establecida desde el comienzo del ciclo por una densidad de siembra más baja, el contraste se acentúa particularmente en el tramo descendente de la cobertura

durante la etapa reproductiva. La CC más reducida representa una menor capacidad de transpiración que repercute directamente sobre la producción de biomasa y, como muestra la Figura 4, ocasiona una tasa de productividad del agua más baja.

La producción de materia seca en los tres lugares monitoreados al norte del lote presenta hacia el final del ciclo valores que están reducidos en una tercera parte respecto a los del sur. Al igual que con la CC, los indicadores estadísticos de la Tabla 4 en términos del coeficiente de determinación, del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970) y el índice de concordancia de Willmott (1981), con valores muy próximos a 1 en todos los casos, expresan que la relación lineal entre la biomasa aérea observada y los valores estimados por el modelo es muy consistente, si bien en la Figura 4 se aprecia una ligera tendencia a la sobrestimación.

La producción final de biomasa en los sectores ubicados al sur del lote de maíz alcanzaron valores, tanto observados como estimados, ligeramente mayores a 30 Mg ha⁻¹. Esta productividad es superior a la que obtuvo Heng *et al.* (2009) para tratamientos sometidos a irrigación completa que, dependiendo de la ubicación geográfica, presentan valores entre 22 y 28 Mg ha⁻¹. Sin embargo, Hsiao *et al.* (2009) presentan algunos resultados de experimentos bajo riego con valores de biomasa aún más elevados entre 35 y 36 Mg ha⁻¹, de modo que los resultados alcanzados en Córdoba, Argentina, con una extensión de ciclo similar se pueden considerar comparables. Abedinpoura *et al.* (2012), quienes evaluaron AquaCrop en un ambiente semiárido de la India, presentan valores máximos de producción de biomasa de maíz sólo de 18 Mg ha⁻¹ en los tratamientos que recibieron un nivel de fertilización nitrogenada sin restricción y la mayor asignación de riego. Este valor notablemente más bajo se asocia con una menor densidad de siembra y un ciclo de cultivo más corto de entre 80 y 90 días.

Habiendo asignado por prueba y error los valores de eficiencia de riego para cada sector que

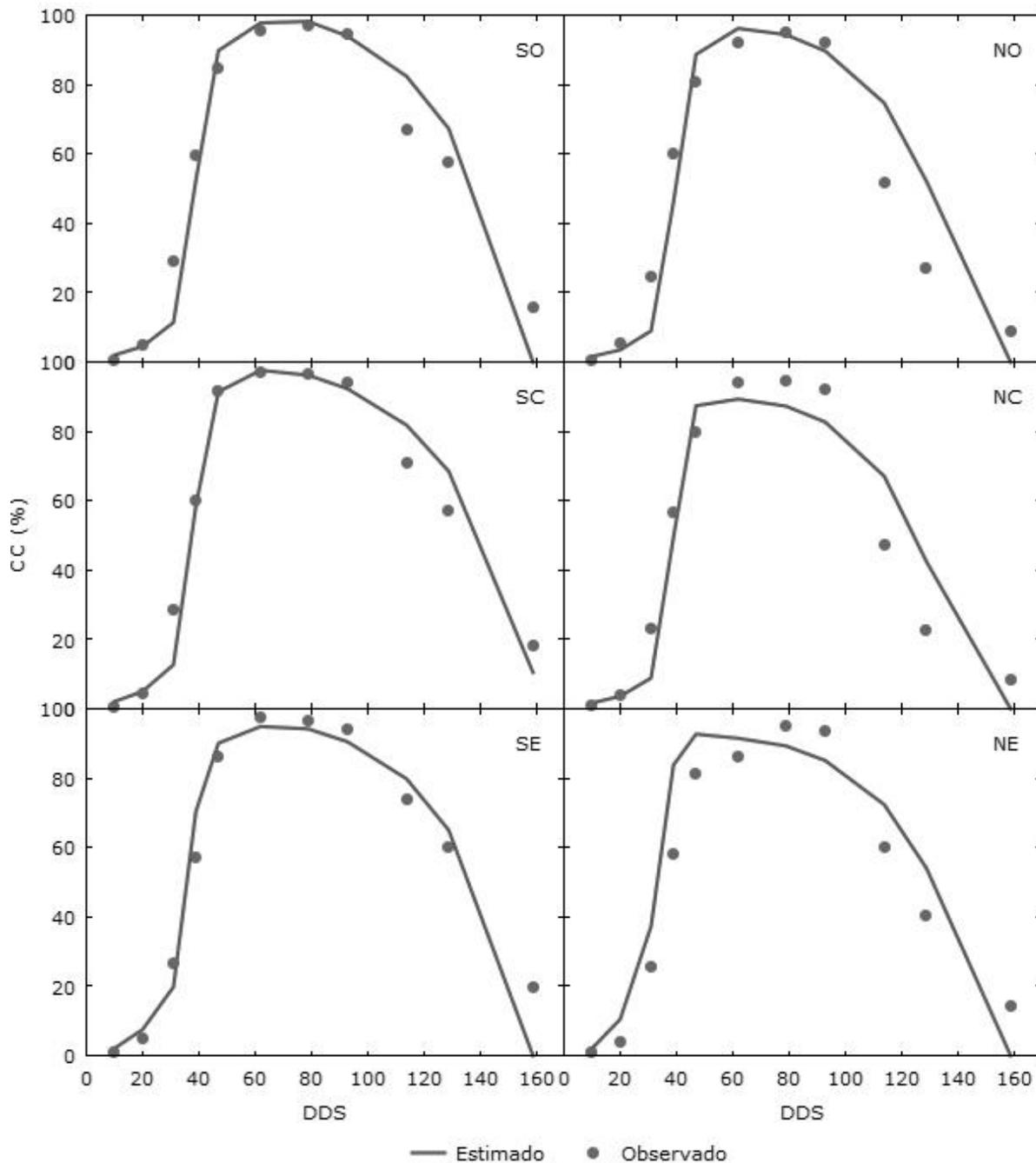


Figura 3. Cobertura del cultivo (CC) observada en distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, Argentina, y estimados con AquaCrop de acuerdo a los días después de la siembra (DDS) en 2013-14.

muestra la Tabla 3, la Figura 5 presenta la relación lineal entre los valores observados y estimados del contenido de agua del suelo hasta 1,1 m de profundidad. Comparado con CC y la producción de biomasa, los indicadores estadísticos de la Tabla 4 ponen de manifiesto que la asociación es menos ajustada en este caso, incluso con cierta falta de

consistencia en el sector SC, de acuerdo al valor negativo que acusa allí el coeficiente de Nash-Sutcliffe. De todos modos, como muestra la Figura 5 la relación lineal para el conjunto completo de la información sobre el contenido de agua se presenta estadísticamente muy significativa ($P < 0,001$), en tanto los indicadores de la capacidad predictiva

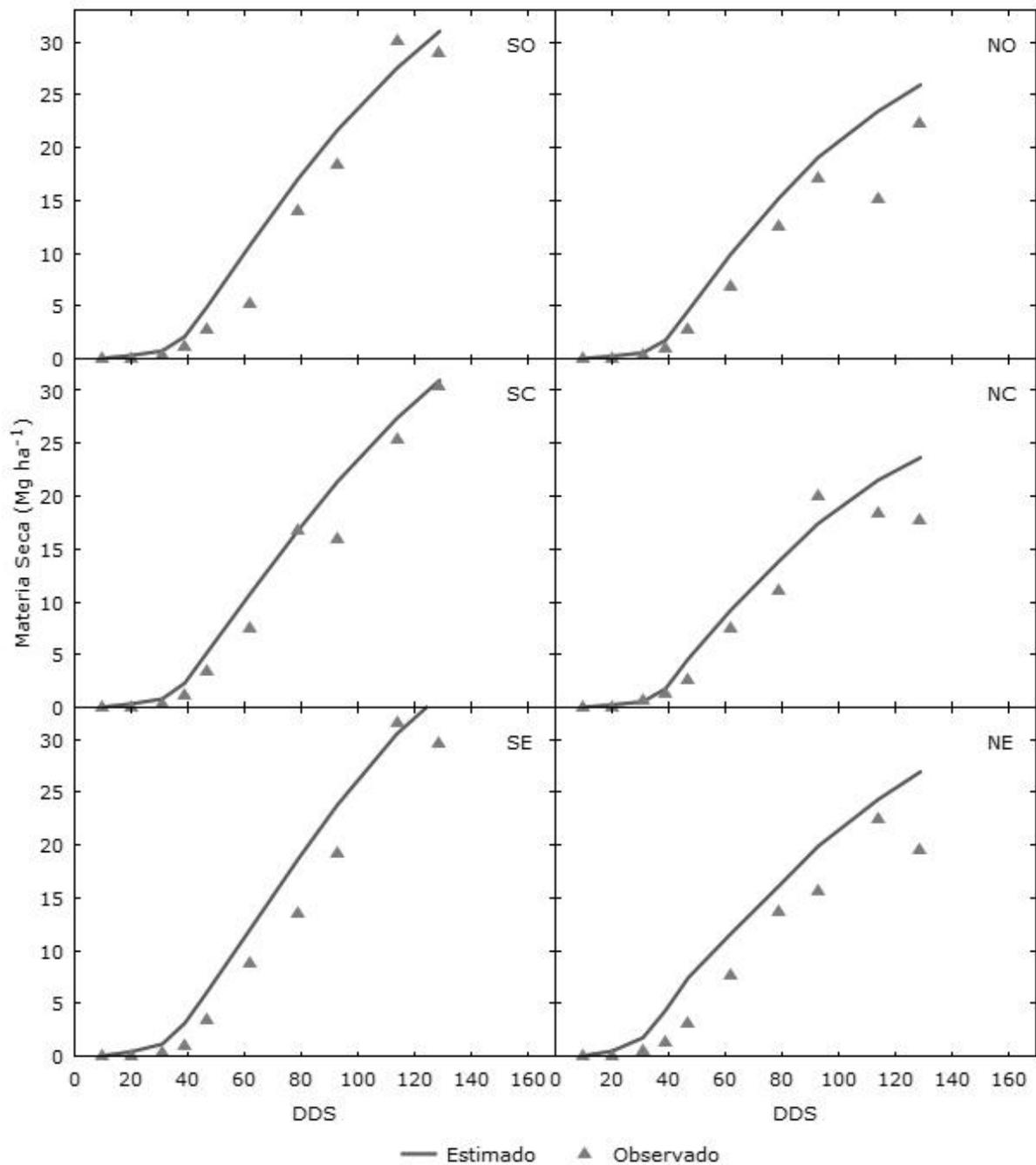


Figura 4. Materia seca observada en distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, Argentina, y valores estimados con AquaCrop de acuerdo a los días después de la siembra (DDS) en 2013-14.

del modelo tienen valores aceptables. Además, el trazado de la curva de regresión no se aparta demasiado de la función de identidad en el rango de agua útil, incluso en el caso de los valores medidos y estimados en SE.

La merma productiva registrada hacia el norte del lote se explica, de acuerdo a la información de

la Figura 5, en razón del contenido de agua del suelo relativamente menor que se registró en esos sectores a los 79 y 114 días después de la siembra, es decir entre floración y maduración del cultivo, y que se pone de manifiesto por igual a partir de los registros observados de humedad como con los estimados por el modelo. Es probable que

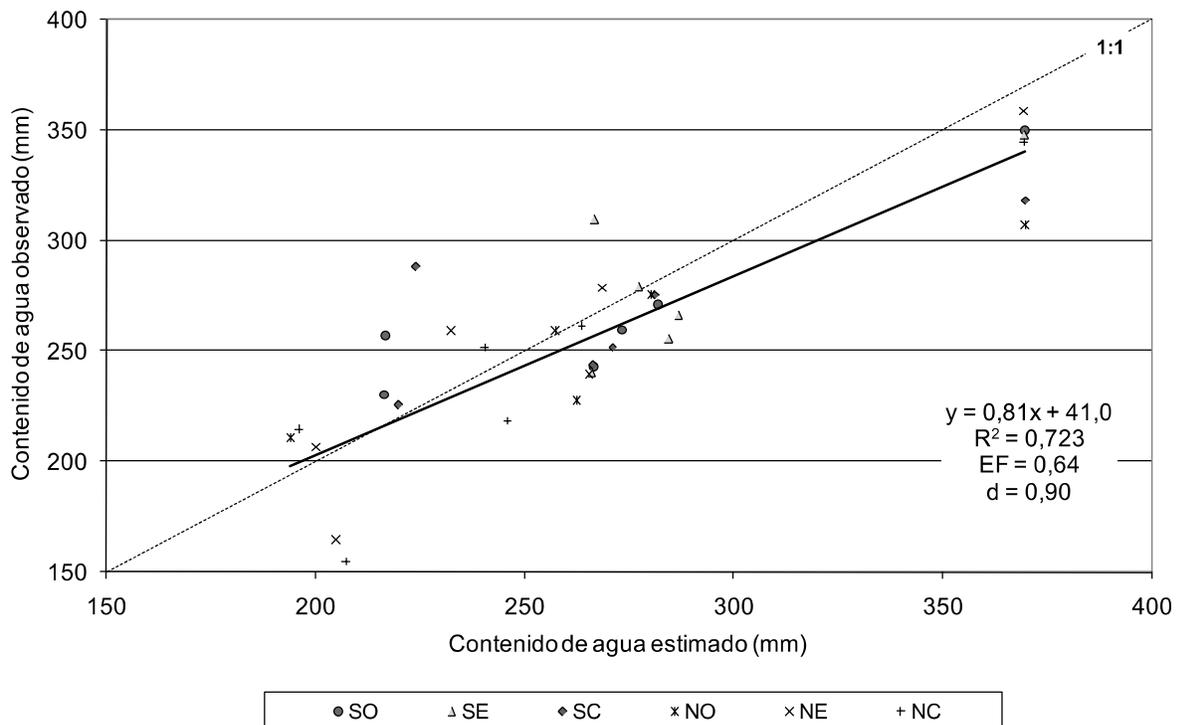


Figura 5. Relación entre el contenido de agua del suelo observado hasta 1,1 m y los valores estimados por AquaCrop en distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, Argentina, en 2013-14. Las referencias son iguales a la Tabla 4.

Tabla 4. Valoración estadística de la relación lineal entre valores observados de cobertura del cultivo, materia seca y contenido de agua del suelo del perfil hasta 1,2 m y estimados por AquaCrop en los distintos sectores del lote de maíz en Córdoba, durante el ciclo 2013-14.

Variable	Indicador estadístico		Sector					
			SO	SC	SE	NO	NC	NE
Cobertura del cultivo (n=11)	R ²		0,95	0,97	0,96	0,89	0,91	0,91
	RMSE	%	9,5	7,1	8	12,7	11,1	12,2
	EF		0,93	0,96	0,95	0,87	0,91	0,87
	d		0,98	0,99	0,99	0,97	0,98	0,97
Materia seca (n=10)	R ²		0,97	0,98	0,97	0,97	0,94	0,96
	RMSE	Mg ha ⁻¹	2,58	2,23	3,00	3,26	2,57	3,58
	EF		0,95	0,96	0,93	0,83	0,89	0,81
	d		0,99	0,99	0,98	0,97	0,98	0,96
Contenido de agua del suelo (n=6)	R ²		0,83	0,49	0,57	0,70	0,83	0,86
	RMSE	mm	22,7	35,9	26,5	41,4	27,5	23,5
	EF		0,65	-0,37	0,46	0,45	0,77	0,85
	d		0,93	0,79	0,86	0,86	0,94	0,96

Referencias. R²: Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio; EF: Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; d: Índice de concordancia de Willmott.

este contenido de agua más reducido, consecuente con la menor eficiencia de riego utilizada en la simulación, además de repercutir sobre los componentes del rendimiento, haya provocado el adelanto de la senescencia como muestra la disminución anticipada de CC en la Figura 3.

Otra forma de mostrar los resultados de la simulación tendiente a evaluar de manera integral la capacidad predictiva de AquaCrop se presenta en la Figura 6, que confronta los valores observados y estimados del rendimiento de granos en los distintos sectores. Los valores observados y esti-

mados de rendimiento, como variable que sintetiza la interacción genotipo-ambiente, presentan una correlación estadísticamente aceptable ($P < 0,016$), si bien se registra una sistemática y acentuada sobrestimación por parte de AquaCrop. Más allá de cierta imprecisión del modelo, claramente se pone de manifiesto el marcado contraste productivo entre los sectores del lote asociado, en primer lugar, a la menor densidad de siembra, y en segundo término a la falta de agua que redujo la biomasa y la productividad del maíz.

La capacidad para simular la variación temporal del contenido de agua agregado espacialmente es importante en los modelos utilizados con fines agrícolas e hidrológicos (Batchelor et al., 2002). Los modelos suelo-planta-atmósfera como AquaCrop han probado ser efectivos para simular el balance de agua del suelo cuando el drenaje se asume vertical (Garrison et al., 1999). No obstante, esta suposición no es correcta en todos los casos, siendo necesario recurrir en muchos lotes a modelos más complejos como SALUS-TERRAE para simular el flujo de agua superficial y sub superficial de manera tridimensional (Basso, 2000). Este modelo tiene la capacidad de simular el agua estancada en las depresiones, el movimiento superficial y subsuperficial del agua, así como los procesos de escorren-

tía que reproducen el ingreso o egreso del agua en cada sector del lote.

Reconociendo la limitación que AquaCrop presenta en este sentido, la buena aptitud para reproducir conjuntamente la dinámica temporal de CC, la materia seca producida, la variación del contenido de agua durante el ciclo y el rendimiento de granos en diferentes sectores de un lote de maíz regado por surcos y siembra variable, avalan el empleo del modelo en su capacidad para expresar la productividad del cultivo. Asimismo, su simpleza y versatilidad lo hacen apropiado para ser usado con la finalidad de analizar las consecuencias económicas de ciertas prescripciones o, como en este caso, a los efectos de evaluar el comportamiento productivo de un lote de maíz con un manejo del agua de riego que, por causas operativas o de su naturaleza intrínseca, no resultó uniforme.

CONCLUSIONES

Una vez calibrado de acuerdo a las condiciones de cobertura del cultivo registradas a campo, AquaCrop estimó de manera adecuada la producción de biomasa de maíz a tasa potencial a partir de un valor de WP^* de $34,4 \text{ g m}^{-2}$, con un requerimiento neto de

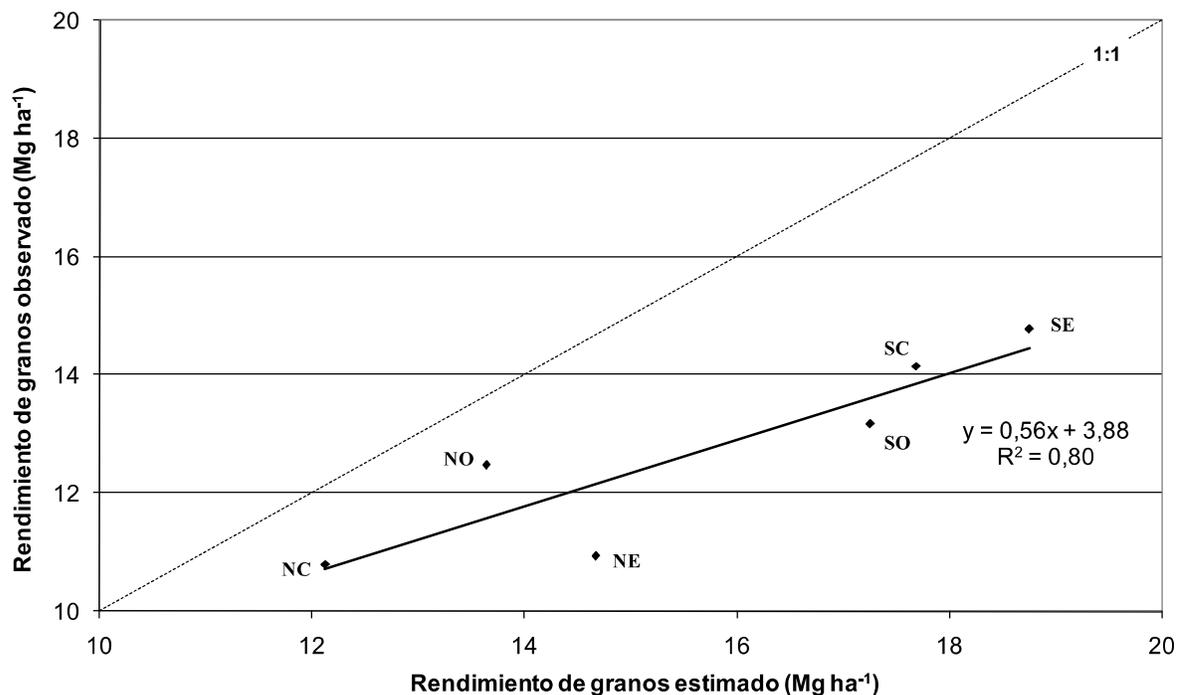


Figura 6. Relación entre el rendimiento observado y estimado por AquaCrop en los sectores monitoreados del lote de maíz en Córdoba, durante el ciclo 2013-14.

riego entre 411 y 433 mm. Si bien el cultivo recibió 5 riegos por surco de 80 mm cada uno, el lote presentó diferencias productivas en el ciclo 2013-14, de modo que la productividad del sector norte resultó marcadamente inferior a la del sector sur. Este comportamiento productivo sistemático respecto al de otros años/cultivos confirma la conveniencia de adoptar un manejo localizado del lote. Por otra parte, a los efectos de producir de manera integral relaciones consistentes entre los valores observados y estimados de CC, materia seca, contenido de agua del suelo y rendimiento de grano la simulación de riego debió considerar una eficiencia de aplicación diferente para los sectores monitoreados, de 40% en el norte y mayor o igual a 60 % en los sectores del sur del lote.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico recibido para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Abedinpour, M., A. Sarangi, T.B.S. Rajput, Man Singh, H. Pathak, and T. Ahmad, 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 110:55-66.
- Andarzian, B., M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M.E. Barati, M.A. Barati, and A. Rahnama, 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100:1-8.
- Basso, B., 2000. Digital terrain analysis and simulation modeling to assess spatial variability of soil water balance and crop production. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, East Lansing, MI.
- Batchelor, W.D., B. Basso, and J.O. Paz, 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ. J. Agronomy* 18:141-158.
- Dardanelli, J.D., O.A. Bachmeier, R. Sereno, and R. Gil, 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crop Res.* 54:29-38.
- de la Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini, and J. Martínez, 2013a. AquaCrop model calibration in potato and its use to estimate yield variability under field conditions. *Atmospheric and Climate Sciences* 2013(3):397-407.
- de la Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini y J. Martínez, 2013b. Estimación de la cobertura del suelo y evaluación de la fertilización en papa con registros de cámaras digitales convencionales y modificadas. *Anales 42 Jornadas Argentinas de Informática* 94-104.
- Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, J.-M. Barnola, and V.I. Morgan, 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *J. Geophys. Res.* 101(D2):4115-4128. doi: 10.1029/95JD03410.
- Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra y E. Mejía-Saénz, 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia* 47:347-359.
- Garrison, M.V., W.D. Batchelor, R.S. Kanwar, and J.T. Ritchie, 1999. Validation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile drained conditions. *Agric. Syst.* 62:189-200.
- Gitelson, A.A., 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161(2):165-173.
- Heng, L.K., T.C. Hsiao, S.R. Evett, T.A. Howell, and P. Steduto, 2009. Testing of FAO AquaCrop model for rain-fed and irrigated maize. *Agron. J.* 101:488-498.
- Hsiao, T.C., L.K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and 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.
- Hunt, E.R., W.D. Hively, S. Fujikawa, D. Linden, C.S. Daughtry, and G. McCarty, 2010. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing* 2(1):290-305.
- Kitchen, N.R., S.T. Drummond, E.D. Lund, K.A. Sudduth, and G.W. Buchleiter, 2003. Soil electrical conductivity and topography to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agron. J.* 95:483-495.
- Li, Y., D. Chena, C.N. Walker, and J.F. Angus, 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research* 118:221-227.
- Mkhabela, M.S., and P.R. Bullock, 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management* 110:16-24.
- Moran, M.S., Y. Inoue, and E.M. Barnes, 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Rem. Sens. Environ.* 61:319-346.
- Mulla, D.J., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering* 114:358-371.
- Nash, J.E., and J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting

- through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Oliver, Y.M., M.J. Robertson, and M.T.F. Wong, 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Europ. J. Agronomy* 32:40-50.
- Pierce, F.J., and P. Nowak. 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67:1-85.
- Raes, D., P.Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model to predict yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101:438-447.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101:426-437.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, and E. Fereres, 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25:189-207.
- Stricevic, R., M. Cosic, N. Djurovic, B. Pejic, and L. Maksimovic, 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management* 98:1615-1621.
- Timlin, D., Y. Pachepsky, C. Walthall, and S. Loechel, 2001. The use of a water budget model and yield maps to characterize water availability in a landscape. *Soil & Tillage Research* 58:219-231.
- Willmott, C., 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2:181-194.