



MODELO DE BALANCE HIDROLÓGICO OPERATIVO PARA EL AGRO (BHOA)

María Elena Fernández-Long; Liliana Spescha; Irene Barnatán y Guillermo Murphy

Docentes de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Facultad de Agronomía,
Universidad de Buenos Aires Av. San Martín 4453.1417, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: flong@agro.uba.ar

Recibido: 14-08-12

Aceptado: 15-11-12

RESUMEN

Se desarrolló un modelo de balance hidrológico operativo con fines agrícolas (BHOA). El mismo tiene por finalidad proporcionar una herramienta de decisión objetiva y en tiempo real para los tomadores de decisión del sector agrícola, así como generar una base de datos de agua en el suelo, disponible para la comunidad científica y educativa. El modelo, basado en la metodología de Thornthwaite-Mather con modificaciones, calcula la evapotranspiración potencial por Penman-Monteith y utiliza constantes hidrológicas representativas de los suelos agrícolas de la Argentina. Para la validación del mismo se correlacionó el índice de satisfacción hídrica (ISHi) con las anomalías de los rendimientos de maíz y trigo para 18 departamentos de la Región Pampeana. Los resultados muestran correlaciones positivas y significativas principalmente durante el período crítico del maíz, en concordancia con las fechas de siembra en los distintos departamentos. En el caso del trigo también se encontraron correlaciones significativas pero durante períodos más extensos.

Palabras clave. Modelos, balance hidrológico, maíz, trigo.

OPERATING WATER BALANCE MODEL FOR AGRICULTURE (OWBA)

SUMMARY

A water balance model has been developed for agricultural aims. It is intended to give an objective decision tool in real time for agricultural decision makers, as well as generate a database of soil water available for the scientific and educational community. The model, based on Thornthwaite-Mather methodology and subsequent amendments, calculates potential evapotranspiration by Penman-Monteith and uses hydrological constant representative of agricultural soils in Argentina. For validation, water satisfaction index (WSI) and anomalies of corn and wheat yields were correlated, for 18 departments of the "pampeana region". We could see that the WSI has significant positive correlations, mainly during the critical period of corn, showing synchronization with sowing dates. In wheat, significant correlations were also found but during longer periods.

Key words. Models, water balance, corn, wheat.

INTRODUCCIÓN

En la expresión del crecimiento de las plantas el agua disponible en el suelo es un factor fundamental. La contribución de agua edáfica en los subperíodos críticos de mayor actividad vegetativa es el principal factor bioclimático en el rendimiento

cuantitativo (Pascale y Damario, 2004). El conocimiento de la disponibilidad de agua en el suelo ha sido motivo de estudio desde los comienzos de la Agrometeorología e interés de los agricultores, los tomadores de decisión de la empresa agropecuaria y, a una escala más amplia, de los gobier-

Fernández Long, M.E.; Spescha, L.; Barnatán, I. y G. Murphy. 2012. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Rev. Agronomía & Ambiente* 32(1-2): 31-47. FA-UBA, Buenos Aires, Argentina.

nos para asegurar la alimentación de sus respectivos países.

Las dificultades técnicas involucradas en su medición han impedido hasta el momento disponer en el país de series observacionales suficientemente largas y para todas las zonas, como para efectuar con ellas una agroclimatología regional del agua edáfica. Por lo tanto una alternativa es estimar la humedad en la zona radical mediante un Balance Hidrológico.

El Balance Hidrológico es un modelo simplificado de estimación de la reserva de agua en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo. A partir del mismo es posible cuantificar la disponibilidad de humedad durante el ciclo de un cultivo y el agua consumida por la planta. Además, con los resultados generados se pueden calcular índices agroclimáticos que nos indiquen la disponibilidad regional de agua en el suelo en forma espacial y temporal según los valores utilizados en el cómputo.

Considerando las utilidades expuestas se han desarrollado numerosos modelos tanto en el exterior (Thornthwaite y Mather, 1955; Holmes y Robertson, 1959; Baier y Robertson, 1969; Smith, 1992; Freebairn *et al.*, 1994; Allen *et al.*, 1998; Saxton y Willey, 2006; Senay, 2008; Raes *et al.*, 2009) como en nuestro país (Burgos y Corsi, 1970; Damario y Pascale, 1977; Forte Lay *et al.*, 1995; Paruelo y Sala, 1995) con distintos grados de complejidad y para diferentes escalas espacio-temporales. Los modelos, generalmente, funcionan bien bajo las condiciones climáticas y agroecológicas en las que fueron diseñados, pero cuando se los utiliza en ambientes distintos es necesario comprobar la bondad de los mismos (Doorenbos y Pruitt, 1975).

En la Argentina, la producción de granos se realiza en su gran mayoría en secano, condición en la que el agua juega un rol fundamental en la determinación del rendimiento y de la producción. Los daños por sequías que afecten la producción

de maíz y trigo tienen un impacto significativo en la economía del país y en el suministro mundial de alimentos. Un ejemplo reciente fue la sequía ocurrida durante la campaña 2008/09 que produjo una merma en la producción de maíz de 8,9 millones de toneladas, un 40% menos que en la campaña anterior (FAO, 2012). En consecuencia, el estudio de esta variable agroclimática y su relación con los rendimientos, a escala de departamentos o partidos, representa una contribución para explicar la productividad de los cultivos en la Región Pampeana argentina.

El objetivo del trabajo es desarrollar un modelo de balance de agua en el suelo para la Argentina que pueda ser implementado en forma operativa. El mismo tiene por finalidad proporcionar una herramienta de decisión objetiva y en tiempo real para los tomadores de decisión del sector agrícola, así como generar una base de datos de agua en el suelo disponible para la comunidad científica y educativa y accesible desde la página web de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. Además, se busca continuar con esta línea de investigación proporcionando las bases para la realización de un pronóstico del agua en el suelo basado en este modelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos meteorológicos

Se trabajó con datos diarios de precipitación, temperatura máxima, mínima y heliofanía efectiva; y con el promedio diario de las 4 observaciones horarias de presión real de vapor, intensidad de viento y presión a nivel de la estación, de cada una de las 120 estaciones meteorológicas operativas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Fig. 1 y Cuadro 1). Toda esta información es brindada por el SMN a través de un Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP sigla en inglés de File Transfer Protocol), de manera de contar con los datos el mismo día de la observación y poder correr el modelo en tiempo real.

Figura 1.
Ubicación de las estaciones
meteorológicas operativas del Servicio
Meteorológico Nacional.



Cuadro 1. Información de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Código	Nombre de la estación	Latitud(° dec)	Longitud(° dec)	Altura SNM (m)
10001	LA QUIACA OBS.	-22,10	-65,60	3459
10006	RIVADAVIA	-24,17	-62,90	205
10008	BENITO JUÁREZ AERO	-37,72	-59,78	207
10011	LAS LOMITAS	-24,70	-60,58	130
10012	SALTA AERO	-24,85	-65,48	1221
10013	VILLAGESSELLA AERO	-37,23	-57,02	9
10017	TUCUMÁN AERO	-26,85	-65,10	450
10031	CHILECITO AERO	-29,23	-67,43	945
10044	CATAMARCA AERO	-28,60	-65,77	454
10062	SANTIAGO DEL ESTERO AERO	-27,77	-64,30	199
10065	TINOGASTA	-28,07	-67,57	1201
10077	LA RIOJA AERO	-29,38	-66,82	429
10080	CURUZÚ CUATÍA AERO	-29,78	-57,98	73
10081	CERESAERO	-29,88	-61,95	88
10082	VILLA MARÍA DEL RÍO SECO	-29,90	-63,68	341
10086	JACHAL	-30,23	-68,75	1175
10087	MONTE CASEROS AERO	-30,27	-57,65	54
10100	CÓRDOBA AERO	-31,32	-64,22	474
10102	CHEPES	-31,33	-66,60	658
10105	CÓRDOBA OBSERVATORIO	-31,40	-64,18	425
10107	ESC. AVIACIÓN MILITAR AERO	-31,45	-64,27	502

Cuadro 1. Información de las estaciones meteorológicas utilizadas (*continuación*).

Código	Nombre de la estación	Latitud(° dec)	Longitud(° dec)	Altura SNM (m)
10111	PILAR OBS. CÓRDOBA	-31,67	-63,88	338
10113	PARANÁ AERO	-31,78	-60,48	78
10117	VILLA DOLORES AERO	-31,95	-65,13	569
10131	MENDOZA AERO	-32,83	-68,78	704
10132	MENDOZA OBSERVATORIO	-32,88	-68,85	827
10133	ROSARIO AERO	-32,92	-60,78	25
10134	GUALEGUAYCHÚ AERO	-33,00	-58,62	21
10138	RÍO CUARTO AERO	-33,12	-64,23	421
10139	SAN LUIS AERO	-33,27	-66,35	713
10143	SAN CARLOS (MZA)	-33,77	-69,03	940
10148	LABOULAYE AERO	-34,13	-63,37	137
10151	TOLHUIN	-54,70	-67,25	105
10154	SAN MIGUEL	-34,55	-58,73	26
10156	BUENOS AIRES	-34,58	-58,48	25
10159	EL PALOMAR AERO	-34,60	-58,60	12
10163	CIPOLLETTI	-38,95	-67,97	265
10164	MORÓN AERO	-34,67	-58,63	24
10166	EZEIZA AERO	-34,82	-58,53	20
10170	LA PLATA OBS.	-34,97	-57,90	23
10177	PUNTA INDIO B.A.	-35,37	-57,28	22
10178	NUEVE DE JULIO	-35,45	-60,88	76
10179	MALARGÜE AERO	-35,50	-69,58	1425
10185	TRENQUELAUQUEN	-35,97	-62,73	95
10186	LAS FLORES AERO	-36,03	-59,13	36
10190	DOLORES	-36,35	-57,73	9
10192	SANTA ROSA AERO	-36,57	-64,27	191
10204	CORONEL SUÁREZ AERO	-37,43	-61,88	233
10206	PIGÜÉ AERO	-37,60	-62,38	304
10210	MAR DEL PLATA AERO	-37,93	-57,58	21
10221	BAHIA BLANCA AERO	-38,73	-62,17	83
10227	NEUQUÉN AERO	-38,95	-68,13	271
10229	RÍO COLORADO	-39,02	-64,08	79
10241	SAN ANTONIO OESTE AERO	-40,78	-65,10	20
10248	MAQUINCHAO	-41,25	-68,73	888
10258	TRELEWA AERO	-43,20	-65,27	43
10270	COMODORO RIVADAVIA AERO	-45,78	-67,50	46
10272	PERITO MORENO AERO	-46,52	-71,02	429
10280	PUERTO DESEADO AERO	-47,73	-65,92	80
10283	GOBERNADOR GREGORES AERO	-48,78	-70,17	358
10285	SAN JULIÁN AERO	-49,32	-67,78	62
10293	RÍO GALLEGOS AERO	-51,62	-69,28	19
10296	RÍO GRANDE B.A.	-53,80	-67,75	22
10298	USHUAIA AERO	-54,80	-68,32	57
10303	ESQUELA AERO	-42,93	-71,15	797
10307	PASO DE INDIOS	-43,82	-68,88	460
10308	USPALLATA	-32,60	-69,33	1891
10309	RECONQUISTA AERO	-29,18	-59,70	53
10311	TANDIL AERO	-37,23	-59,25	175
10323	BARILOCHE AERO	-41,15	-71,17	840

Cuadro 1. Información de las estaciones meteorológicas utilizadas (*continuación*).

Código	Nombre de la estación	Latitud(° dec)	Longitud(° dec)	Altura SNM (m)
10325	SAN RAFAEL AERO	-34,58	-68,40	748
10326	TARTAGAL AERO	-22,65	-63,82	450
10332	AEROPARQUE AERO	-34,57	-58,42	6
10334	GENERAL PICO AERO	-35,70	-63,75	145
10335	VILLA REYNOLDS AERO	-33,73	-65,38	486
10339	ORÁN AERO	-23,15	-64,32	357
10346	PASO DE LOS LIBRES AERO	-29,68	-57,15	70
10353	IGUAZÚ AERO	-25,73	-54,47	270
10362	POSADAS AERO	-27,37	-55,97	125
10369	MARCOS PAZ AERO	-32,70	-62,15	114
10370	SAN MARTÍN (MZA)	-33,08	-68,42	653
10451	SAUCE VIEJO AERO	-31,70	-60,82	18
10453	JUNÍN AERO	-34,55	-60,92	81
10456	PEHUAJO AERO	-35,87	-61,90	87
10470	CORRIENTES AERO	-27,45	-58,77	62
10476	CHAMICAL AERO	-30,37	-66,28	461
10477	CONCORDIA AERO	-31,30	-58,02	38
10483	FORMOSA AERO	-26,20	-58,23	60
10489	RESISTENCIA AERO	-27,45	-59,05	52
10490	TRES ARROYOS	-38,33	-60,25	115
10495	SAN JUAN AERO	-31,57	-68,42	598
10500	JUJUY AERO	-24,38	-65,08	905
10501	VIEDMA AERO	-40,85	-63,02	7
10522	ITUZAINGO	-27,58	-56,67	72
10523	BERNARDO DE IRIGOYEN AERO	-26,25	-53,65	815
10525	CHAPELCO AERO	-40,08	-71,13	779
10531	OLAVARRÍA AERO	-36,88	-60,22	166
10543	JUJUY UN	-24,17	-65,18	1302
10544	BOLIVAR AERO	-36,20	-61,07	94
10547	SANTATERESITA AERO	-36,55	-56,68	4
10551	VENADO TUERTO	-33,67	-61,97	112
10553	SAN FERNANDO	-34,45	-58,58	3
10556	OBERÁ AERO	-27,48	-55,13	303
10564	EL TREBOL	-32,20	-61,67	96
10566	PUERTO MADRYN AERO	-42,73	-65,07	136
10567	EL BOLSON AERO	-41,97	-71,52	337
10770	BASE ESPERANZA	-63,40	-56,98	24
10771	BASE ORCADAS	-60,75	-44,72	12
10777	BASE BELGRANO II	-77,87	-34,57	256
10781	BASE JUBANY	-62,23	-58,63	11
10783	BASE MARAMBIO	-64,23	-56,72	198
10793	BASE SAN MARTÍN	-68,13	-67,13	7
11201	CORONEL PRINGLES AERO	-38,02	-61,33	247
17364	METÁN	-25,48	-64,80	855
17375	AZUL AERO	-36,83	-59,88	147
17970	PCIA. ROQUE SAENZ PEÑA AERO	-26,75	-60,40	93
18017	EL CALAFATE AERO	-50,27	-72,05	204
18030	SANTA ROSA DE CONLARA AERO	-32,67	-65,32	620
18250	SUNCHALES AERO	-30,97	-61,33	92

Datos de suelo

La capacidad de un suelo de almacenar agua depende de la cantidad y tamaño de sus poros, es decir de su estructura, textura y contenido de materia orgánica. En las provincias pampeanas los valores de capacidad de campo (CC) medidos hasta el metro oscilan entre 150 y 400 mm de lámina de agua desde la zona arenosa del sudoeste cercana a la ciudad de Santa Rosa hasta la costa de los ríos Paraná y de la Plata y la provincia de Entre Ríos. Sin embargo mediciones de actividad radical muestran que en los suelos arenosos la penetración de las raíces sobrepasa fácilmente el metro (Fagioli, 1972), mientras que en los suelos arcillosos de la cuenca baja del Río Salado (al este de la región) la mayor actividad se encuentra hasta los 50 cm (Alippe y Brinnand, 1979). Se supone un comportamiento similar en los suelos cercanos a la costa de los ríos Paraná y de la Plata, lo mismo que en la provincia de Entre Ríos.

Las constantes hidrológicas de los suelos, CC y punto de marchitez (PM) utilizados en el modelo no se refieren a una profundidad fija, sino que tienen en cuenta la profundidad típica de exploración radicular en cada zona (Fig. 2). Las mismas fueron obtenidas a través de un consenso entre valores determinados experimentalmente a campo por el CIBIOM (Centro de Investigaciones Biometeorológicas), valores estimados por Falasca y otros (1998) mediante el modelo de Ritchie y Crum (1989) y estimaciones del INTA (Damiano y Taboada, 2000; Damiano, 2010). Los datos correspondientes a la Región Pampeana ya han sido utilizados en trabajos previos (Hurtado, 2008; Spescha, 2008). Para la Patagonia, dado que no se contó con información medida a campo, se estimó un valor promedio a partir del modelo Soil Water Characteristic (SWC, saxton and Rawls, 2006) (Fig. 2).

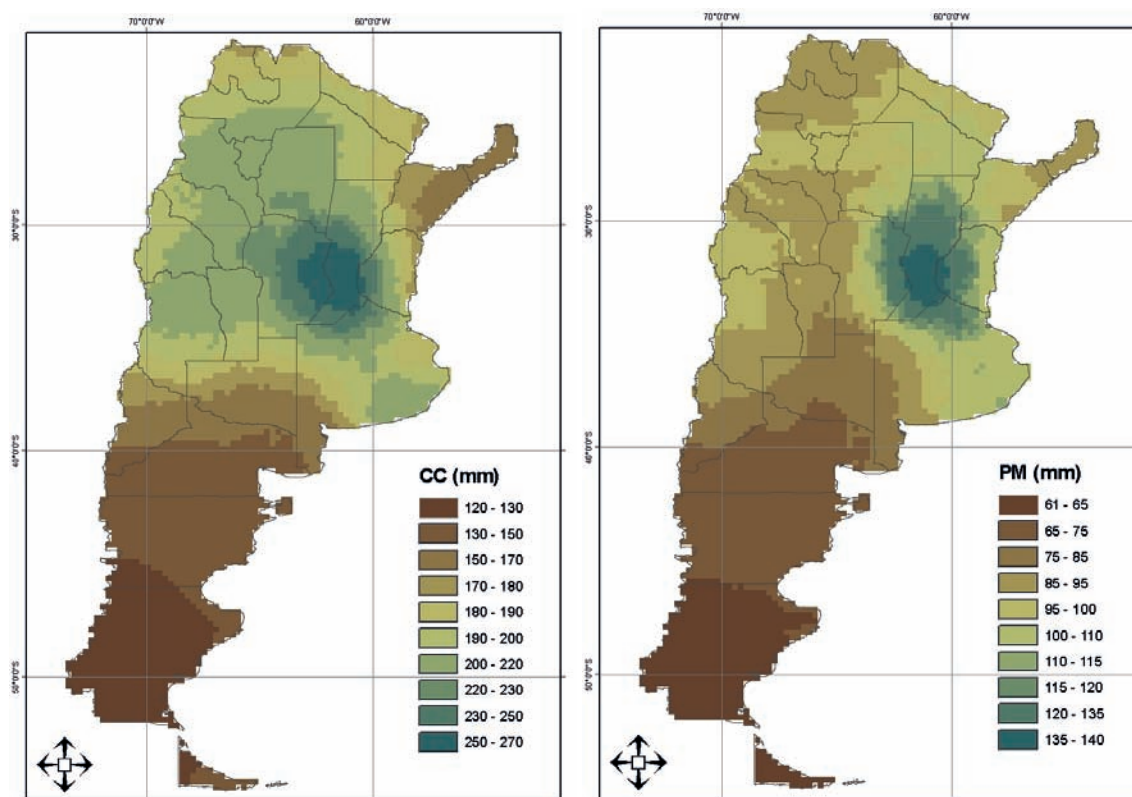


Figura 2. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) expresado en milímetros.

Datos fenométricos

Dado que no se pudo hacer la validación del modelo con valores observados de humedad del suelo por falta de observaciones correspondientes a la escala regional de este trabajo, la misma se realizó en forma indirecta con datos de rendimiento y fechas de siembra de maíz y trigo a escala departamental para las campañas comprendidas entre 1969/70-2010/11 en los partidos de: Ceres, Rosario y Santa Fe capital (provincia de Santa Fe); Concordia, Gualaguaychú y Paraná (provincia de Entre Ríos), Río Cuarto, Laboulaye y Marcos Juárez (provincia de Córdoba); General Pico y Santa Rosa (provincia de La Pampa) y Junín, Nueve de Julio, Pehuajó, Tres Arroyos, Pigué, Tandil, y Mar del Plata (provincia de Buenos Aires). Esta información fue provista por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina (SIIA, 2010).

Debido a que en el período analizado se registraron cambios en el manejo y en la tecnología disponible que pudieron afectar positivamente el rendimiento (Vossen, 1989; Hough, 1990), se hizo necesario filtrar de alguna forma este efecto. Para ello se calcularon los promedios móviles en cinco años de los rendimientos; luego se calculó la diferencia entre el rendimiento de cada año en particular menos el promedio móvil de ese período y se lo dividió por el promedio, de manera de independizar las anomalías de los valores promedios de rendimiento de cada zona de la Región Pampeana, a fin de que los resultados sean comparables. En el comienzo y fin de las series de rendimientos los promedios se realizaron con los cinco primeros y últimos años, de manera de no perder información. Este tratamiento se aplicó tanto para el maíz como para el trigo. A modo de ejemplo se presentan los datos de rendimiento de maíz y sus anomalías para la estación de Marcos Juárez (Cuadro 2).

Metodología de cálculo de la evapotranspiración potencial

Se calculó la evapotranspiración potencial diaria (EP) a través de la ecuación de Penman-Monteith recomendada por la FAO (Allen *et al.*, 1998).

$$EP = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Cuadro 2. Rendimientos de maíz en el departamento de Marcos Juárez (provincia de Córdoba) y los valores de las medias móviles y anomalías calculadas a partir de los mismos.

Campaña	Rendimiento	Media móvil	Anomalía
1969/70	2400	2454	-0,02
1970/71	3097	2454	0,26
1971/72	1200	2454	-0,51
1972/73	2750	2594	0,06
1973/74	2822	2414	0,17
1974/75	3100	3013	0,03
1975/76	2197	3356	0,35
1976/77	4196	3591	0,17
1977/78	4462	3451	0,29
1978/79	4000	4099	-0,02
1979/80	2400	3850	-0,38
1980/81	5438	3758	0,45
1981/82	2951	3458	-0,15
1982/83	4000	3878	0,03
1983/84	2500	3615	-0,31
1984/85	4500	3885	0,16
1985/86	4125	3963	0,04
1986/87	4300	3766	0,14
1987/88	4390	3266	0,34
1988/89	1516	3541	-0,57
1989/90	2000	3681	-0,46
1990/91	5500	3833	0,43
1991/92	5000	4610	0,08
1992/93	5150	5250	-0,02
1993/94	5400	5410	0,00
1994/95	5199	5630	-0,08
1995/96	6300	6200	0,02
1996/97	6100	6620	-0,08
1997/98	8000	7080	0,13
1998/99	7500	7576	-0,01
1999/00	7500	8146	-0,08
2000/01	8780	8502	0,03
2001/02	8950	8782	0,02
2002/03	9780	9202	0,06
2003/04	8900	9186	-0,03
2004/05	9600	9636	0,00
2005/06	8700	9500	-0,08
2006/07	11.200	9430	0,19
2007/08	9100	9770	-0,07
2008/09	8550	9830	-0,13
2009/10	11.300	9830	0,15
2010/11	9000	9830	-0,08

donde:

- EP evapotranspiración potencial diaria (mm día⁻¹)
 R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹) (Ecuación 6)
 G flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)
 T temperatura media del aire (°C) (Ecuación 4)
 u_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹) (Ecuación 15)
 e_s presión de vapor de saturación (kPa) (Ecuación 5)
 e_a presión real de vapor (kPa)
 Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹) (Ecuación 3)
 γ constante psicrométrica (kPa °C⁻¹) (Ecuación 2)

La constante psicrométrica γ se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} \quad (2)$$

donde

- c_p calor específico a presión constante = 1,013 x 10⁻³ [MJ kg⁻¹ °C⁻¹]
 P Presión atmosférica (Ecuación 3)
 ϵ cociente del peso molecular del vapor de agua sobre el aire seco = 0,622
 λ calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg⁻¹]

El calor latente de vaporización (λ) varía en función de la temperatura, pero, debido a que lo hace levemente dentro de los rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de 2,45 MJ kg⁻¹ para la simplificación de la ecuación de FAO Penman-Monteith. Este valor corresponde al calor latente de vaporización a una temperatura del aire de alrededor de 20 °C.

La pendiente de la curva de presión de vapor (Δ) se calculó como:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \epsilon \left(\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (3)$$

donde T es la temperatura del aire [°C] que fue calculada como:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (4)$$

La presión de vapor de saturación (e_s) se calculó como:

$$e_s = 0,611 e^{\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right)} \quad (5)$$

El flujo de calor en el suelo (G) se ignoró, debido a que para los cálculos diarios la magnitud de este flujo es relativamente pequeña (Allen *et al.*, 1998). La radiación neta (R_n) es el balance entre la radiación entrante y la radiación saliente. Se calculó como la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (6)$$

La radiación neta de onda corta (R_{ns}) resulta del balance entre la radiación entrante y la radiación reflejada por:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (7)$$

donde α es el albedo o coeficiente de reflexión del canopeo. En general se utiliza un valor de 0,23 para una pastura de referencia. R_s es la radiación solar entrante (también llamada radiación global) y se estima como:

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (8)$$

donde

- R_s radiación solar entrante (o radiación global) [MJ m⁻² día⁻¹]
 R_a radiación solar en el tope de la atmósfera (o radiación astronómica) [MJ m⁻² día⁻¹] (Ecuación 9)
 n heliofanía efectiva [hs]
 N heliofanía astronómica [hs]
 a constante de regresión, que expresa la fracción de radiación extraterrestre que llega a la Tierra en días muy nublados ($n = 0$)
 a y b fracción de la radiación extraterrestre que llega a la Tierra en días despejados ($n = N$). Se utilizó 0,18 y 0,55 respectivamente.

$$R_a = \frac{24 - 60}{\pi} C_s d_\gamma [\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s] \quad (9)$$

donde

R_a	radiación solar en el tope de la atmósfera [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
C_s	constante solar = $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$
d_r	distancia relativa inversa Tierra-Sol (Ecuación 10)
ω_s	ángulo horario a la puesta del Sol [rad] (Ecuación 12)
φ	latitud [rad]
δ	declinación solar [rad] (Ecuación 11)

La radiación solar R_a está expresada en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, para expresarlo en mm de agua evaporable se debe multiplicar por 0,408. La latitud está expresada en radianes y es negativa en el hemisferio sur. La distancia relativa inversa Tierra-Sol se calcula como:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (10)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (11)$$

donde J es el número del día en el año entre el 1 (1 de enero) y el 365 o 366 (31 de diciembre).

El ángulo horario a la puesta del sol ω_s y la declinación solar δ se calculan como:

$$\omega_s = \arccos[-\tan \varphi \tan(\delta)] \quad (12)$$

La radiación neta de onda larga (R_{nl}) resulta de la ley de Stefan-Boltzmann que expresa que la energía emitida por un cuerpo es proporcional a su temperatura a la cuarta potencia, por lo cual

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_x^4 + T_n^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (13)$$

donde:

R_{nl}	radiación neta de onda larga [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
σ	constante de Stefan-Boltzmann [$4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]
T_x	temperatura máxima en grados Kelvin
T_n	temperatura mínima en grados Kelvin
e_a	presión real de vapor [kPa]
R_s	radiación solar entrante (o radiación global) [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$] (Ecuación 10)

R_{so} radiación solar en días despejados [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$] (Ecuación 14)

El cálculo de la radiación solar cuando el cielo está despejado R_{so} , o sea cuando $N=n$ se calcula como:

$$R_{so} = (a + b) R_a \quad (14)$$

donde a y b son la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la superficie terrestre en días de cielo despejado ($n=N$). Los coeficientes utilizados 0,18 y 0,55 respectivamente.

En la ecuación FAO Penman-Monteith, la radiación neta, expresada en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, se convierte a mm día^{-1} (evaporación equivalente) usando 0,408 como factor de conversión dentro de la ecuación.

Criterios utilizados en el caso de datos faltantes

Al trabajar en tiempo real, es muy común que las series de datos provenientes de las estaciones meteorológicas tengan información faltante. Dado que el contenido de agua en el suelo está fuertemente condicionado por lo ocurrido el día anterior, debido a que existe una gran persistencia en la extracción de agua del suelo y el modelo trabaja con valores de almacenaje del día anterior, no es posible admitir la ausencia de datos. Por lo tanto, es necesario estimar los datos en el caso de no tenerlos. En general, los datos faltantes son los horarios, o sea tensión de vapor, intensidad de viento y presión a nivel de la estación los cuales fueron estimados a partir de los datos de temperatura mínima y máxima según lo recomendado por la FAO (Allen *et al.*, 1998).

El viento en las estaciones meteorológicas está medido a 10 metros de altura por lo cual, el valor de viento utilizado surge de la ecuación:

$$u_2 = u_{10} \frac{4,87}{\ln(678 - 5,42)} \quad (15)$$

donde

u_2	velocidad del viento a 2 m [m s^{-1}]
u_{10}	velocidad del viento a 10 m [m s^{-1}]

En aquellos casos en que el dato de viento no se hubiere informado, se reemplaza el dato por el promedio diario del viento para esa localidad.

Cuando la presión real de vapor (e_a) no se hubiere informado, se calcula como:

$$e_a = 0,611 e^{\left(\frac{17,27 T_{min}}{T_{min} + 237,2}\right)} \quad (16)$$

Para calcular P se utilizó la simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20 °C:

donde

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293}\right)^{5,26} \quad (17)$$

P presión atmosférica [kPa]

z elevación sobre el nivel del mar [m]

Cuando los valores diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y/o precipitación son datos faltantes, se utiliza el valor de la media diaria calculada con todos los años de la serie.

Metodología del balance hidrológico

El modelo de balance hidrológico se basó en el desarrollado por Thornthwaite-Matter (1955) (de ahora en adelante TM), modificado luego por Forte Lay y otros (1995). A partir de este modelo, se han desarrollado numerosos trabajos en los cuales se compararon mediciones realizadas a campo con los resultados estimados (Forte Lay y Burgos, 1978; Forte Lay y Villagra, 1983; Forte Lay *et al.*, 1985; 1987; Troha y Forte Lay, 1990).

El balance se establece entre la demanda atmosférica de agua (término denominado evapotranspiración potencial (EP)) y la oferta de agua, dada por la precipitación (PP) y el agua almacenada en el suelo (ALM). Como el suelo y la vegetación que lo cubre no siempre ceden a la atmósfera toda el agua que les es demandada, se define el concepto de evapotranspiración real (ER), que es lo que realmente se pierde por evapotranspiración en cada situación. Cuando la PP supera a la EP el suelo comienza a recargarse hasta llegar a la CC, a partir de ese momento el exceso de agua se pierde por escorrentía y percolación.

La ecuación que relaciona los elementos del balance es la siguiente:

$$PP - ER - \Delta ALM - EXC = 0 \quad (18)$$

donde:

ΔALM variación del almacenaje en el suelo

EXC exceso

En este trabajo, se incorporó al modelo una modificación desarrollada por Forte Lay (inédito) la cual busca mejorar la representación del contenido de agua en suelos pesados para evitar un desecamiento excesivo, incorporando un algoritmo que termina modificando los resultados sólo en los casos en que el PM es mayor que el 40% de la CC y en forma progresiva a medida que ese porcentaje va aumentando, de manera que los suelos más arcillosos del este de la Región Pampeana no se van a secar tanto; los del oeste (arenosos) con PM menores o iguales al 40% de CC seguirán igual, y los del centro (francos) tendrán variaciones menores con respecto a lo que ocurría con los modelos anteriores.

Para el cálculo de los resultados, lo primero que se obtiene es el déficit potencial (DP), definido como la diferencia entre la precipitación (PP) y la evapotranspiración potencial (EP)

$$DP = PP - EP \quad (19)$$

En segundo lugar se calcula el almacenaje (ALM). Cuando el DP es positivo, se considera que toda el agua precipitada ingresa al suelo quedando:

$$ALM_t = ALM_{t-1} + DP \quad (20)$$

Si DP es negativo, entonces:

$$ALM_t = ALM_{t-1} e^{DP/CCD} \quad (21)$$

dónde

$$CCD = CC - ELD \quad (22)$$

ELD es un límite de desecamiento que hace que el suelo no se seque nunca más allá de ese umbral, eliminando la limitación que presentaba el modelo de TM que consideraba que el almacenaje podía llegar a cero. ELD se calcula a partir de la variable LD como:

$$LD = \left(\frac{PM}{CC} - 0,4\right) 2,5 \quad (23)$$

Luego si:

$$si \begin{cases} LD < 0 & LD' = 0 \\ 0 \leq LD \leq 1 & LD' = LD \\ LD > 1 & LD' = 1 \end{cases}$$

Entonces:

$$ELD = LD' * PM \quad (24)$$

Cuando el ALM supera la CC se considera que el agua restante no puede permanecer en el suelo, por lo tanto escurre. A esa cantidad de agua se la llama exceso, y se la calcula como:

$$EXC = ALM_{t-1} + DP - CC \quad (25)$$

Luego se calcula el ΔALM como:

$$ALM = ALM_t - ALM_{t-1} \quad (26)$$

Cuando ΔALM es negativo indica que el suelo se está secando, y esa cantidad de agua se pierde a través de la evapotranspiración, por lo tanto:

$$ER = I(ALM) + PP \quad (27)$$

En cambio, cuando el ΔALM es positivo indica que el suelo se está recargando. En estos casos la ER va a ser igual a la EP debido a que el suelo tiene suficiente agua para evapotranspirar lo que la atmósfera demanda y, lo que resta se almacena en el suelo, entonces:

$$ER = EP \quad (28)$$

Cuando la ER es menor que la EP se considera que las plantas comienzan a sufrir un estrés hídrico, por lo tanto se calcula el déficit (DEF) como:

$$DEF = EP - ER \quad (29)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo

Para la validación del modelo se correlacionaron los resultados del mismo, con los datos de rendimiento departamental de maíz y trigo de 18 partidos de la Región Pampeana. Se trabajó con el índice de satisfacción hídrica (ISHi) calculado como:

$$ISHi_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{ER_d}{EP_d}}{n} \quad (30)$$

donde:

ER_d evapotranspiración real diaria

EP_d evapotranspiración potencial diaria

j varía de 1 a 3 indicando la década del mes.

n número de días de la década considerada (8, 9, 10 u 11)

Este índice se calculó para las tres décadas¹ de cada mes (36 décadas/año) para las estaciones meteorológicas de Ceres, Rosario y Sauce Viejo (provincia de Santa Fe); Concordia, Gualeguaychú y Paraná (provincia de Entre Ríos), Río Cuarto, Laboulaye y Marcos Juárez (provincia de Córdoba); General Pico y Santa Rosa (provincia de La Pampa) y Junín, Nueve de Julio, Pehuajó, Tres Arroyos, Pigué, Tandil, Dolores y Mar del Plata (provincia de Buenos Aires) para el período 1969-2011.

El estrés producido por la falta de agua durante el período de crecimiento de los cultivos afecta los rendimientos de grano, y, si el mismo ocurre durante la floración, el impacto es mucho más grave que si se produce durante la fase vegetativa (Denmead and Shaw, 1960; Sudar *et al.*, 1981). Por lo tanto, se analizaron las correlaciones entre el ISHi a lo largo del año y los rendimientos de los cultivos,

¹ Década: período de diez días entre el 1 y el 10, y entre el 11 y el 20. La última década del mes puede tener 8, 9, 10 u 11 días (International Meteorological Vocabulary, N° 182, TP 91, World Meteorological Organization, 1966).

buscando si el modelo es capaz de captar este requerimiento de los cultivos.

En el Cuadro 3 se presentan las correlaciones entre las anomalías de los rendimientos de maíz y el ISHi calculado desde la primera década de septiembre (del año de la siembra) a la última década de abril (del año de la cosecha) para los 18 departamentos estudiados. En general se observan correlaciones positivas significativas en todos los casos entre los meses de diciembre, enero y en algunos casos hasta marzo; este resultado indica que el período crítico del cultivo respecto a la necesidad de agua, que corresponde a los 15 días anteriores y posteriores a R1 (Cárcova *et al.*, 2003), se ubica en estos meses, aunque en algunos departamentos, como por ejemplo, Río Cuarto es más largo aún, incluyendo también los meses de noviembre y marzo. La extensión del período con correlaciones positivas, bastante más largo que la duración del período crítico del cultivo, está relacionada con la diversidad de fechas de siembra que se producen en cada departamento y con el diferente comportamiento fenológico de las distintas variedades utilizadas. En otros departamentos de Córdoba el período es mucho menor. En Labou-

laye las correlaciones significativas van desde la última década de diciembre hasta la tercera de febrero; y en Marcos Juárez desde la segunda de diciembre hasta la tercera de enero.

Las fechas promedio de siembra difieren, siendo más tardías en Laboulaye y Río Cuarto, lo que provoca un retraso del período crítico. Esta circunstancia se refleja en un atraso del período de máximas correlaciones que se extiende de la tercera década de diciembre hasta la última de enero en Marcos Juárez y llega hasta febrero en Laboulaye y hasta marzo en Río Cuarto.

Para explicar estas diferencias se analizó la fecha de siembra (Cuadro 4) y la variabilidad de la misma, considerando el comienzo como la fecha en que se sembró el 10% del área y el fin cuando se sembró el 90%. En Marcos Juárez ese período corresponde en promedio a 25 días, mientras que en Laboulaye es de 49 días y en Río Cuarto de 65 días, indicando que la variabilidad de fechas en este último es mucho mayor, a consecuencia de una gran diversidad de situaciones (siembras que van de principios de octubre hasta dos meses después). La utilización de material genético de diferente ciclo y comportamiento feno-

Cuadro 3. Valores del coeficiente de correlación "r" calculado entre el ISHi (calculado entre la primera década del mes de octubre y hasta la tercera década del mes de abril) y las anomalías de los rendimientos de maíz para 18 departamentos de la Región Pampeana. (* significativo al 95%, ** significativo al 98%, *** significativo al 99%).

		Córdoba			Santa Fe			Entre Ríos			La Pampa		Buenos Aires																			
Mes	j	Río Cuarto	Laboulaye	M. Juárez	Ceres	Sauce Viejo	Rosario	Concordia	Paraná	Gualeday	G. Pico	Sta. Rosa	Junín	9 de Julio	Pehuajó	Pigüé	Tandil															
Oct	1	0,05	0,15	0,12	-0,05	-0,23	0,04	0,03	-0,01	0,12	0,13	0,09	0,07	-0,02	0,04	0,22	-0,09															
	2	0,17	0,05	0,15	-0,18	-0,22	-0,04	0,23	-0,14	0,20	0,25	0,07	0,13	0,05	0,31	0,27	-0,12															
	3	0,27	0,18	0,14	-0,03	-0,18	0,08	0,07	-0,13	0,22	0,24	0,31	0,16	0,10	0,11	0,37	0,08															
Nov	1	0,21	0,18	0,23	-0,05	-0,01	0,19	0,29	-0,05	0,26	0,07	0,04	0,28	0,09	0,15	0,14	0,12															
	2	0,37	**	0,16	0,16	0,07	0,08	0,22	0,25	0,00	0,16	0,12	0,22	0,31	0,24	0,14	0,19	0,11														
	3	0,33	*	0,20	0,27	0,26	0,34	*	0,23	0,22	0,13	0,33	*	0,17	0,08	0,27	0,28	0,20	0,19	0,14												
Dic	1	0,22	0,16	0,25	0,18	0,54	***	0,20	0,28	0,33	*	0,26	0,23	0,13	0,35	*	0,24	0,24	0,26	0,16												
	2	0,34	*	0,28	0,32	*	0,39	***	0,43	0,29	0,34	*	0,40	***	0,40	0,18	0,10	0,20	0,27	0,31	*	0,06	0,33	*								
	3	0,42	***	0,33	*	0,51	***	0,37	***	0,51	***	0,49	***	0,44	***	0,52	***	0,40	***	0,19	0,17	0,40	***	0,45	***	0,48	***	-0,06	0,35	*		
Ene	1	0,37	**	0,42	0,56	***	0,38	***	0,58	0,60	0,53	0,68	***	0,66	0,35	*	0,38	***	0,41	***	0,39	**	0,60	***	0,60	***	0,26	0,27	0,27			
	2	0,45	***	0,43	***	0,57	***	0,16	0,45	***	0,49	***	0,46	***	0,64	***	0,42	***	0,35	*	0,34	*	0,36	**	0,30	0,45	***	0,20	0,33	*		
	3	0,60	***	0,60	***	0,58	***	0,21	0,50	***	0,54	***	0,51	***	0,67	***	0,49	***	0,39	***	0,43	***	0,35	*	0,32	*	0,49	***	0,55	***	0,39	***
Feb	1	0,37	**	0,51	***	0,28	0,27	0,43	0,42	***	0,43	***	0,42	0,41	0,35	*	0,25	0,46	***	0,49	***	0,40	***	0,40	***	0,40	***	0,27	0,46	***		
	2	0,37	**	0,39	**	0,17	0,20	0,45	0,36	**	0,30	0,37	**	0,45	***	0,39	**	0,27	0,36	**	0,36	*	0,48	***	0,32	*	0,55	***	0,32	0,55	***	
	3	0,36	**	0,33	*	0,07	0,03	0,36	*	0,29	0,14	0,13	0,31	*	0,27	0,19	0,42	***	0,13	0,39	***	0,39	***	0,30	0,45	***	0,30	0,45	***	0,30	0,45	***
Mar	1	0,38	**	0,13	0,13	0,06	0,20	0,01	0,24	0,01	0,20	0,12	0,07	0,34	*	-0,07	0,30	-0,02	0,30	-0,02	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	
	2	0,40	***	0,13	0,29	0,08	0,21	0,23	0,29	0,02	0,28	0,26	0,13	0,23	0,08	0,28	0,00	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	3	0,36	**	-0,12	0,20	0,07	0,17	0,26	0,21	0,12	0,19	0,35	*	0,24	0,28	0,19	0,29	0,01	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Abr	1	0,21	-0,16	0,23	-0,07	0,06	0,04	0,07	-0,12	-0,06	0,30	0,10	-0,01	0,18	0,28	-0,17	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	2	0,11	-0,08	0,22	-0,10	0,00	-0,14	0,14	0,00	0,01	0,21	0,06	0,00	0,08	0,21	-0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	3	0,16	-0,08	0,16	-0,19	-0,01	-0,02	0,10	0,16	0,17	0,10	0,03	0,06	0,18	-0,03	-0,10	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

Cuadro 4. Fechas medias de inicio y fin de siembra de maíz, período medio desde el comienzo hasta la finalización de la siembra y fecha media de siembra de maíz en Córdoba.

	Fecha inicio	Fecha fin	Período	Fecha media
Laboulaye	10-10	01-12	49	05-11
M. Juárez	14-09	11-10	25	27-09
Río Cuarto	08-10	12-12	65	10-11

lógico es, como ya se ha mencionado, otra circunstancia que afecta la duración del período con correlaciones elevadas.

El mismo análisis realizado para maíz se repitió para el cultivo de trigo. En el Cuadro 5 se muestran los resultados de las correlaciones entre el ISHi y las anomalías de los rendimientos de trigo.

Los coeficientes de correlación presentan períodos con valores significativos mucho más extensos que en el caso del maíz.

Este hecho podría deberse a que la duración de las etapas de crecimiento y desarrollo en trigo dependen de varios factores ambientales como la temperatura, el fotoperíodo, la vernalización y la disponibilidad hídrica (Fisher, 1984), así como de la sensibilidad del genotipo a los factores ambientales (Slafer, 1994; Slafer *et al.*, 2003). El rendimiento está determinado principalmente por el número de granos/m² (que surge del producto del número de espigas/m², el número de espiguillas por espiga y el número de granos por espiguilla) cada uno de los cuales se define a lo largo de distintas etapas fenológicas para dar el rendimiento final.

Cuadro 5. Valores del coeficiente de correlación "r" calculado entre el ISHi (calculado entre la primera década del mes de octubre y hasta la tercera década del mes de abril) y las anomalías de los rendimientos de maíz para 18 departamentos de la Región Pampeana. Referencias (* significativo al 95%, ** significativo al 98%, *** significativo al 99%).

Mes	j	Río Cuarto	Laboulaye	M. Juárez	Ceres	G. Pico	Sta. Rosa	N. de Julio	Pigüé	Tandil	Tres Arr.	M. del Plata	B. Blanca
Mar	1	0,23	0,32 *	0,32 *	0,17	0,00	0,11	0,09	-0,01	0,00	-0,08	0,06	-0,18
	2	0,40 ***	0,37 **	0,32 *	0,33 *	0,04	0,29	0,01	0,18	0,06	-0,08	0,09	0,15
	3	0,29	0,27	0,29	0,41 ***	0,22	0,37 **	0,02	0,34 *	0,07	0,03	0,09	0,22
Abr	1	0,37 **	0,25	0,37 **	0,55 ***	0,14	0,25	0,01	0,02	0,05	-0,06	0,05	0,16
	2	0,41 ***	0,32 *	0,36 **	0,42 ***	0,28	0,37 **	0,10	0,04	-0,04	-0,14	0,01	0,26
	3	0,22	0,17	0,37 **	0,31 *	0,27	0,25	0,26	0,11	-0,04	-0,16	-0,03	0,32 *
May	1	0,40 ***	0,26	0,45 ***	0,47 ***	0,19	0,25	0,16	0,15	-0,10	-0,12	-0,04	0,41 ***
	2	0,38 **	0,25	0,33 *	0,39 ***	0,09	0,20	0,01	0,06	0,02	-0,02	-0,06	0,36 *
	3	0,49 ***	0,33 *	0,37 **	0,37 **	0,02	0,17	0,05	0,10	0,02	-0,06	-0,02	0,44 ***
Jun	1	0,30	0,21	0,36 *	0,36 **	0,09	0,19	0,08	0,18	0,07	0,03	0,05	0,45 ***
	2	0,42 ***	0,29	0,42 ***	0,34 *	0,14	0,25	0,10	0,28	0,27	0,12	0,19	0,47 ***
	3	0,47 ***	0,31 *	0,39 **	0,38 **	0,19	0,16	0,14	0,16	0,20	0,19	0,27	0,43 ***
Jul	1	0,44 ***	0,46 ***	0,36 **	0,33 *	0,31 *	0,29	0,14	0,27	0,08	0,24	0,32 *	0,51 ***
	2	0,31 *	0,39 **	0,27	0,32 *	0,27	0,27	0,13	0,26	0,20	0,24	0,33 *	0,54 ***
	3	0,51 ***	0,39 **	0,33 *	0,28	0,27	0,32 *	0,29	0,33 *	0,11	0,27	0,23	0,44 ***
Ago	1	0,50 ***	0,45 ***	0,39 **	0,32 *	0,27	0,38 **	0,23	0,32	0,19	0,29	0,30	0,51 ***
	2	0,50 ***	0,41 ***	0,35 *	0,30	0,38 **	0,43 ***	0,10	0,36 *	0,18	0,20	0,28	0,49 ***
	3	0,54 ***	0,45 ***	0,45 ***	0,41 ***	0,46 ***	0,44 ***	-0,03	0,31	0,12	0,29	0,34 *	0,47 ***
Sep	1	0,47 ***	0,52 ***	0,49 ***	0,48 ***	0,42 ***	0,43 ***	0,08	0,36 *	0,21	0,35 *	0,33 *	0,47 ***
	2	0,59 ***	0,55 ***	0,46 ***	0,25	0,50 ***	0,58 ***	-0,08	0,45 ***	0,12	0,33 *	0,28	0,47 ***
	3	0,55 ***	0,64 ***	0,41 ***	0,12	0,51 ***	0,52 ***	-0,15	0,45 ***	0,16	0,28	0,25	0,43 ***
Oct	1	0,44 ***	0,56 ***	0,45 ***	0,12	0,59 ***	0,46 ***	-0,24	0,41 **	0,20	0,19	0,20	0,24
	2	0,40 ***	0,49 ***	0,25	-0,01	0,38 **	0,42 ***	-0,14	0,47 ***	0,22	0,40 ***	0,11	0,53 ***
	3	0,30	0,30	0,28	0,16	0,47 ***	0,42 ***	-0,25	0,51 ***	0,24	0,39 **	0,26	0,41 ***
Nov	1	0,42 ***	0,41 ***	0,23	0,25	0,29	0,51 ***	-0,28	0,36 *	0,11	0,34 *	0,20	0,46 ***
	2	0,25	0,35 *	0,13	0,22	0,24	0,52 ***	-0,28	0,48 ***	0,13	0,26	0,15	0,39 ***
	3	0,11	0,21	-0,02	0,10	0,21	0,47 ***	-0,23	0,58 ***	0,04	0,40 ***	0,06	0,33 *
Dic	1	0,06	0,13	0,11	0,11	0,09	0,33 *	0,01	0,46 ***	0,01	0,43 ***	0,02	0,32 *
	2	0,01	0,04	0,06	-0,05	0,05	0,37 **	0,12	0,20	0,18	0,26	0,11	0,22
	3	0,08	-0,01	0,06	0,08	0,04	0,13	0,00	0,04	0,23	0,31 *	0,16	0,08

En la región central y norte de la provincia de Buenos Aires (departamentos de Junín, Pehuajó, Nueve de Julio, Tandil, etc.) no se encontraron correlaciones significativas. Este hecho responde a que casi toda la provincia de Buenos Aires presenta una buena disponibilidad hídrica en los meses de julio a noviembre. Esta variable no constituye una limitante importante de los rendimientos a escala departamental en esta amplia región (Hurtaido, 2008).

Utilización del modelo

La utilización del modelo permite generar mapas de distintas variables de salida que dan la posibilidad de realizar un seguimiento de la disponibilidad hídrica en el suelo a lo largo del ciclo de los cultivos y analizar la variabilidad tanto espacial como temporal. Una de las variables utilizadas es el agua útil porcentual (AU%) que se calcula como:

$$AU\% = \frac{AU_t}{AUP} * 100 \quad (31)$$

dónde

$$AUP = CC - PM \quad (32)$$

y AU_t es el agua útil para el día t calculada como:

$$AU_t = ALM_t - PM \quad (33)$$

La Figura 3 muestra la evolución del AU% durante el período crítico del cultivo de maíz (desde la tercera década de diciembre hasta la última de enero) en la Región Pampeana para las campañas 2008/09 y 2009/10. Las mismas fueron elegidas por haber presentado condiciones de agua en el suelo muy diferentes que llevaron a rendimientos promedio muy contrastantes. Puede apreciarse claramente las grandes diferencias tanto espaciales como temporales. La campaña 2008/09 pre-

sentó muy bajos niveles de agua en el suelo en el período crítico lo que se tradujo en una producción de maíz de 15 millones de toneladas. En cambio en la campaña siguiente (2009/10), con muy buena disponibilidad de agua en el perfil, se llegó a una producción de maíz de 28 millones de toneladas (FAO, 2012).

CONCLUSIONES

El modelo desarrollado permite captar la variabilidad espacial y temporal del agua almacenada en el suelo. A partir de las correlaciones con los datos de rendimientos de maíz y trigo se pudo comprobar que el mismo tiene un muy buen desempeño a escala departamental, proporcionando una herramienta de decisión objetiva y en tiempo real para los tomadores de decisiones del sector agrícola.

La puesta en marcha del modelo ha permitido generar mapas de distintas variables de salida que son publicados una vez por mes en la página del Centro de Información Agroclimática (CIAG, <http://www.agro.uba.ar/centros/ciag/info/AU>) y por el INTA (http://climayagua.inta.gob.ar/balance_de_agua_en_el_suelo) dando la posibilidad de visualizar la dinámica espacial y temporal de la disponibilidad de agua edáfica en la región.

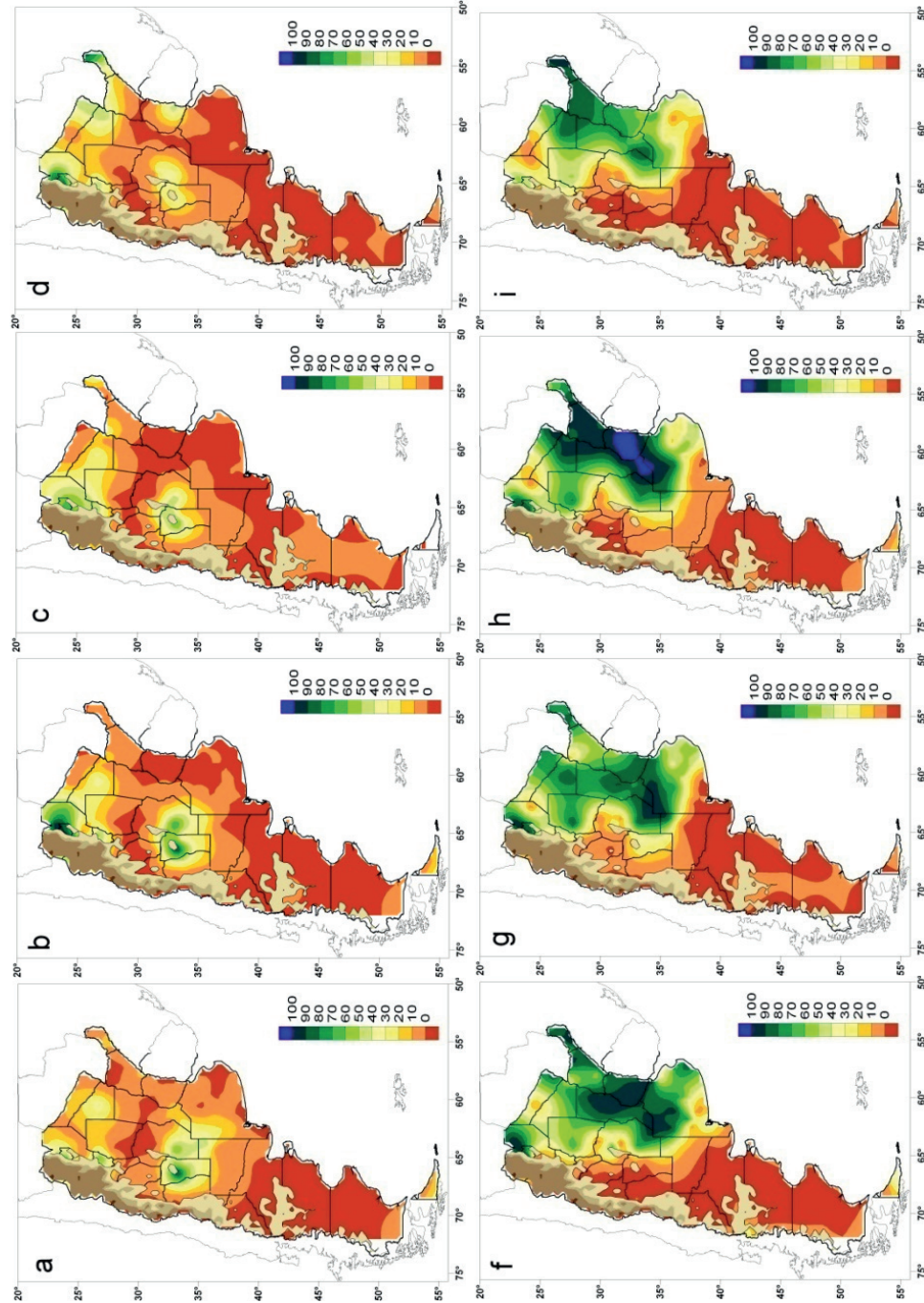


Figura 3. Evolución del AU% para las campañas 2008/09 (a: 3ra década de diciembre de 2008, b, c, y d: 1ra, 2da y 3ra década de enero 2009 respectivamente) y 2009/2010 (f: 3ra década de diciembre de 2009, g, h, y i: 1ra, 2da y 3ra década de enero 2010 respectivamente).

BIBLIOGRAFÍA

- Alippe, H.A. y R. Brinnand, 1979. Distribución y dinámica de la biomasa subterránea de un pastizal natural de la depresión del Salado (prov. de Buenos Aires). Cátedra de Fisiología Vegetal de la Facultad de Agronomía de la U.B.A.
- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.
- Baier, W. and G.W. Robertson. 1966. A new versatile soil moisture budget. *Canadian Journal Plant Sci.* 46: 299-315.
- Burgos J. y W. Corsi. 1970. Comprobación de métodos de simulación de Balances de agua computados con datos meteorológicos. *Bol. Tec.* 57 La Estanzuela, Uruguay.
- Cárcova, J.; L. Borrás y M.E. Otegui. 2003. Producción de Granos, bases funcionales para su manejo. Capítulo 8. Editores: Satorre, E.H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; Elba B. de la Fuente; Miralles, D.J.; Otegui, M.E. y Savin, R. Ed. Facultad de Agronomía. 783 páginas.
- Damario, E.A. y J.A. Pascale. 1977. El balance hidrológico seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. *Rev. Fac. Agron., La Plata* 53(1-2): 15-34.
- Damiano, F. y M.A. Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Ciencia del suelo* 18: 77-88.
- Damiano, F. 2010. Predicción del agua disponible en suelos pampeanos a través de funciones de edafotransferencia. *En: Fertilidad de Suelos, Caracterización y Manejo en la Región Pampeana*. Editorial Fac. de Agronomía, UBA. 423 pag. ISBN 978-950-29-1074-1.
- Denmead, O.T. and R.H. Shaw. 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agron. J.* 52: 272-274.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. *In: FAO Irrigation and Drainage Paper* (FAO), N° 24 / FAO, Rome (Italy). Land and Water Development Div., 1975, 193 pp.
- Fagioli, M. 1972. Modalidades de utilización del agua profunda por el cultivo de pasto llorón, en un suelo regosol de la región semiárida pampeana. *Rev. de Inv. Agrop. INTA serie 3 IX(2)*: 61-70.
- Falasca, S.; A. Ulberich y S. Mordenti. 1998. Constantes hidrológicas de la provincia de Buenos Aires por dominio edáfico. *Actas XVII Congreso Nacional del Agua*. 2: 49-56.
- FAO 2012. FAOSTAT data. Statistics Division. (<http://faostat3.fao.org/home/index.html>).
- Fischer, R.A. 1984. Growth and yield wheat. *In: Proceedings Symposium on potential productivity of field crops under different environments*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philipinas, pp. 129-154.
- Forte Lay, J.A. y J.J. Burgos. 1978. Verificación de métodos de estimación de la variación del almacenaje de agua en suelos pampeanos. *Actas del Taller Argentino Estadounidense sobre sequías (CONICET NSF)*, realizado en Mar del Plata entre el 4 y el 8 de Diciembre de 1978. Editor J.J. Burgos. Buenos Aires, Argentina. Pág. 162-180. Noviembre de 1983.
- Forte Lay, J.A. y M.M. Villagra. 1983. El balance hidrológico de Thornthwaite y Mather (1955) aplicado bajo diferentes unidades de tiempo. Verificación con valores observados y comparación de resultados. *Actas del XI Congreso Nacional del Agua*. Córdoba (Argentina), mayo de 1983. Tomo I, Aguas Superficiales 1. Pág. 89-119.
- Forte Lay, J.A.; A. Troha y M.M. Villagra. 1985. Calibración de la sonda de neutrones para un Hapludol típico y un Argiudol vértico de la provincia de Buenos Aires. *Revista Ciencia del Suelo*. Argentina. Vol. 3 N° 2. Pág. 166-172.
- Forte Lay, J.A.; A. Troha y M.M. Villagra. 1987. Estudio de las variaciones del agua edáfica en pradera permanente, barbecho y cultivos estacionales. *Actas de la IIIa Reunión Argentina de Agrometeorología. (AADA)*. Vaquerías, Córdoba (Argentina). Pág. 47-53. Marzo de 1987. *Actas del XII Congreso Nacional del Agua*, Mendoza (Argentina).
- Forte Lay, J.A.; J.L. Aiello y J. Kuba. 1995. Software AGROAGUA Versión 4.0. Congreso Agrosoft'95. Juiz de Fora (Brasil). Octubre de 1995. Resumen publicado en revista Agrosoft'95. <http://www.agrosoft.com.br/eventos/agrosoft95/trabalhos.htm>.
- Freebairn, D.M.; N.A. Hamilton; P.G. Cox and D. Holworth. 1994. HOWWET? Estimating the storage of water in your soil using rainfall records. A computer program-©. Agricultural Production Systems Research Unit, CSIRO, Toowoomba, Queensland. <http://www.apsim.info/How/HowWet/how%20wet.htm>

- Holmes, R.M. and S.W. Robertson. 1959. A modulated soil moisture budget. *Monthly Weather Rev.*, 87(3): 101-106.
- Hough, M.N. 1990. Agrometeorological aspects of crops in the United Kingdom and Ireland . A review for sugar beet, oilseed rape, peas, wheat, barley, oats, potatoes, apples and pears. EUR 13039 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, pp 310.
- Hurtado, R. 2008. Relación entre el rendimiento del cultivo de trigo y el almacenaje estimado de agua en el suelo, en las cinco provincias pampeanas. Tesis de maestría en Meteorología Agrícola. UBA. Buenos Aires, octubre de 2008, 117 pag.
- Pascale, A.J. y E.A. Damario. 2004. Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología. Editorial Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires. 550 pp.
- Paruelo, J. M. and O.E. Sala. 1995. Water losses in the Patagonian Steppe: a modelling approach. *Ecology* 76: 510-20.
- Raes, D.; P. Steduto; T.C. Hsiao and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101(3): 438-447.
- Ritchie, J.T and J. Crum. 1989. Converting soil survey characterization data into IBSNAT crop model input. Land qualities in space and time. 155-167.
- Saxton, K.E. and P.H. Willey. 2006. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. Chapter 17. In: Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, V. P. Singh and D. Frevert, Editors; CRC Press, pp 401-435.
- Saxton, K.E. and W.J. Rawls. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, VOL. 70: 1569-1578.
- Senay, G.B. 2008. Modelling landscape evapotranspiration by integrating land surface phenology and a water balance algorithm. *Algorithms* 2008, 1, 52-68; DOI: 10.3390/a1020052.
- SIIA, 2010. Sistema Integrado de Información Agropecuaria, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. (<http://www.siiia.gov.ar/>).
- Slafer, G.A.; D.J. Miralles; R. Savin; E.M. Whitechurch y F.G. Gonzalez. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. En: Satorre, E.; Benech-Arnold, R.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M.E. y Savin, R. (eds.), Editorial Facultad de Agronomía. Pp. 101-134. ISBN 950-29-0713-2
- Slafer, G.A. and H. Rawson. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologist and modellers. *Australian Journal of Plant Physiology* 21: 393-426.
- Smith, M. 1992. CROPWAT A computer program for irrigation planning an management. FAO, Irrigation and drainage paper N° 46: 133 pp. ISBN 92-5-103106-1.
- Spescha, L.B. 2008. Relación entre el almacenaje de agua en el suelo y los rendimientos de soja en la región oriental de secano de Argentina. Tesis de Maestría en Meteorología Agrícola. Buenos Aires, octubre de 2008, 97 pag.
- Sudar, R.A.; K.E. Saxton and R.G. Spomer. 1981. A predictive model of water stress in corn and soybeans. *Trans. of Am. Soc. Agric. Engr.* 24(1): 97-102.
- Thornthwaite, C.W. and J.R. Mather. 1955. The water balance. Publications in Climatology VIII, (1):104 p. Drexel Inst. of Tech., New Jersey. USA.
- Troha, A. y J.A. Forte Lay. 1990. Estimación de la humedad edáfica mediante distintos métodos de balance hidrológico diario. GEOACTA (AAGG). Argentina. Vol. 17 N° 1 Pag. 69-78.
- Vossen, P. 1989. An Agrometeorological contribution to quantitive and qualitative rainy season quality monitoring in Botswana. Ph.D. thesis. Faculty of Agricultural Sciences, State University of Gent, Belgium.