



ADAPTACIÓN DEL SWB PARA MODELAR LA INFLUENCIA DE LA FREÁTICA SALINA SOBRE EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO

Marcos, J.¹ y Videla Mensegue, H.²

¹Investigador independiente. javiermarcos@agro-data.net

²EEA INTA Marcos Juárez. Castelli 16, Laboulaye, Córdoba. videla.horacio@inta.gob.ar

RESUMEN

Se adaptó el modelo SWB para la simulación de la influencia recíproca de la fluctuación de la capa freática y salinidad del suelo en la producción de cultivos. Este modelo estima en forma detallada y mecanística los procesos de balance hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera como también el desarrollo y crecimiento de cultivos. Con la adaptación se le adicionó la capacidad de simular la fluctuación de la capa freática, el transporte de sales en el perfil y las interacciones de ambos con los cultivos. Se simularon y analizaron dos situaciones representativas del sur de Córdoba con diferentes régimen pluviométrico, profundidad y salinidad de freática. Según la información obtenida, el SWB se presenta como una herramienta adecuada para comprender y cuantificar las relaciones funcionales entre la capa freática salina y el rendimiento de cultivos.

Palabras clave: freática, salinidad, rendimiento

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la relación capa freática somera y cultivo se señaló como factor de alta importancia para la producción agropecuaria de la región pampeana subhúmeda a semiárida de Argentina (Nosetto *et al.*, 2015; Cisneros *et al.*, 2013). Nosetto *et al.* (2009) analizaron la influencia recíproca entre la profundidad de la freática y el rendimiento del cultivo en esta región y coinciden con Cisneros *et al.* (2013) en destacar la ausencia de un enfoque más explícito de las relaciones freática-cultivo en los modelos de cultivos más usados. Por otra parte, Cisneros *et al.*, (1999) desarrollaron un modelo empírico para la región sudeste de Córdoba para predecir las oscilaciones de capa freática somera según un esquema conceptual que incluye un balance hidrológico entre precipitaciones y evapotranspiración potencial. Sin embargo, para la región de estudio, actualmente no se tiene conocimiento sobre modelos mecanísticos de la zona vadosa que expliquen cuantitativamente las relaciones funcionales de las interacciones entre freática, cultivos y salinidad. El modelo de cultivos SWB (Soil Water Balance) (Marcos, 1997; Campbell & Stöckle, 1993) simula el continuo suelo-cultivo-atmósfera y ha sido calibrado y usado en esta región para el análisis del balance hídrico en cultivos (Videla Mensegue *et al.*, 2016). No obstante, el SWB no incluía hasta el momento la dinámica de la freática y sales y sus influencias conjuntas sobre el cultivo. El objetivo de este trabajo fue adaptar el modelo SWB para la simulación de la influencia recíproca de la capa freática salina sobre el crecimiento de cultivos en forma mecanística. Esto permitirá utilizar este modelo como herramienta para comprender y cuantificar con mayor detalle las interacciones entre la capa freática salina y el crecimiento del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del modelo

El SWB es un modelo de paso diario y horario que estima los procesos de balance hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera, desarrollo del cultivo, crecimiento foliar y radicular, producción de biomasa y rendimiento. Se describen a continuación solo aquellas relaciones del modelo que son relevantes a los objetivos de este trabajo.

El balance hídrico calculado por el SWB incluye los procesos de precipitación, escurrimiento, infiltración, redistribución del agua en el perfil de suelo, percolación profunda, transpiración del cultivo y evaporación. El transporte de agua se estima mediante una solución numérica de la ecuación de Richard's. Esto permite simular flujos de agua en el perfil tanto ascendentes como descendentes. El perfil de suelo es dividido en elementos separados por nodos en los cuales se definen potencial agua de suelo, contenido hídrico y fracción de raíces. El cambio de contenido hídrico en cada nodo i está dado según la ecuación de Richard's como:

$$\rho_w \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z_i} \left(K_i \frac{\partial \psi_{mi}}{\partial z_i} \right) + g \frac{\partial K_i}{\partial z_i} - U_i \quad (1)$$



donde, ρ_w es la densidad del agua (kg m^{-3}), θ_i es el contenido hídrico volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), t es tiempo (s), z_i es el espesor de la capa i (m), K_i es la conductividad hidráulica (kg s m^{-3}), ψ_{mi} es el potencial de agua matricial (J kg^{-1}), g la constante gravitatoria (m s^{-2}) y U_i es la utilización de agua por parte de las raíces en la capa i ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). La conductividad hidráulica en cada nodo se relaciona con el contenido y potencial agua del suelo. Se implementa un sistema de ecuaciones planteando la ecuación de Richard's en cada nodo y el sistema se resuelve mediante una solución numérica de diferencias finitas. A este sistema se le provee como condiciones de límite valores de evaporación e infiltración en la superficie del perfil y de potencial agua en la parte inferior del mismo.

La evapotranspiración potencial (ETP) se calcula según Penman-Monteith. La ETP se divide en evaporación potencial ($E_p = ETP (I-F)$) y transpiración potencial del cultivo ($T_p = ETP F$) basado en la fracción de la radiación solar que es absorbida por el suelo ($I-F$) y la que es interceptada por el cultivo (F), respectivamente (Campbell & Stöckle, 1993). El crecimiento de biomasa afecta el balance de agua mediante cambios en el índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) los cuales a su vez influyen F , la transpiración y la evaporación. La acumulación de biomasa (G_{TR} , $\text{kg biomasa m}^{-2} \text{día}^{-1}$) se calcula como el mínimo del crecimiento limitado por radiación y por agua (método dual). El primero es función de la radiación fotosintéticamente activa (PAR , $\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$) interceptada por el dosel del cultivo. Ambos métodos tienen como parámetros de cultivo las eficiencias de uso de radiación (RUE , $\text{kg biomasa MJ}^{-1}$) y de transpiración (K_{BT} , $\text{kg biomasa kPa}^{-1} \text{agua}$). El crecimiento limitado por agua se calcula de acuerdo a Tanner & Sinclair (1983):

$$G_{TR} = K_{BT} \frac{T}{VPD} \quad (2)$$

donde T es la transpiración actual del cultivo en $\text{kg de agua m}^{-2} \text{día}^{-1}$ y VPD es el déficit de presión de vapor del aire medio en horas de sol en kPa .

El desarrollo del cultivo es estimado mediante la acumulación de tiempo térmico y determina la partición de biomasa entre las partes de las plantas controlando la biomasa destinada a hojas, tallos y a los órganos reproductivos o de cosecha. El desarrollo también opera en los cálculos del crecimiento de raíces en profundidad y de las fracciones de las mismas en cada capa de suelo (F_{ri}).

Cuando el suelo está húmedo la tasa de transpiración se acerca a T_p y a medida que se seca, el agua se encuentra cada vez menos disponible para la planta. La tasa a la cual el suelo y el sistema de raíces pueden abastecer con agua la demanda de transpiración está determinada por la humedad de suelo y la distribución de raíces en el suelo. La tasa de utilización de agua por parte de la planta en cada capa i se calcula con la siguiente ecuación de flujo:

$$U_i = C_{pi}(\psi_{si} - \bar{\psi}_{hoja}) \quad (3)$$

Donde C_{pi} es la conductancia de la planta en cada nodo (kg s m^{-4}), ψ_{si} es el potencial agua de suelo en el nodo i y $\bar{\psi}_{hoja}$ el potencial agua de hoja medio en el dosel del cultivo (J kg^{-1}). La tasa máxima de transpiración posible (E_{max} , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) justo antes del cierre estomático y cuando el suelo se encuentra completamente húmedo puede formularse como $E_{max} = C_{pmax} (-\psi_{hoja-sc})$, donde C_{pmax} representa la conductancia de un cultivo sano, totalmente desarrollado y sin limitación de agua y $\psi_{hoja-sc}$ (J kg^{-1}) es el potencial agua de hoja justo antes del cierre estomático. Los valores de E_{max} y $\psi_{hoja-sc}$ son provistos como parámetros de cultivo para obtener el valor de C_{pmax} . La conductancia de la planta en cada nodo C_{pi} está dada como $C_{pi} = C_p F_{ri}$ donde C_p es la conductancia total de la planta y se estima como el producto de C_{pmax} y F . La tasa de transpiración (U_{max} , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) decrece casi linealmente con la disminución del potencial agua actual que presenta el suelo desde un valor máximo cuando $U_{max} = E_{max}$ en la situación sin limitación de agua en el suelo hasta un valor en que el potencial agua del suelo alcanza el punto de marchitez permanente del cultivo en cuestión (ψ_{pmp} , J kg^{-1}). Esta relación se expresa así:

$$U_{max} = E_{max} F \left(1 - \frac{\bar{\psi}_s}{\psi_{pmp}} \right) \quad (4)$$

Donde $\bar{\psi}_s$ es el potencial agua medio del suelo ponderado por F_{ri} . El factor F es agregado a la ecuación como factor de proporción cuando el cultivo no cubre totalmente el suelo. Asumiendo que la planta ajusta su conductancia de acuerdo a la demanda hídrica de la canopia, un determinado consumo de agua a nivel de toda la canopia (U , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es entonces:

$$U = C_p (\bar{\psi}_s - \bar{\psi}_{hoja}) \quad (5)$$



La transpiración total es la suma de U_i calculada para cada nodo i según ecuación (3). Además, U_i se usa en la ecuación (1) para estimar el consumo de agua en cada nodo debido a transpiración. La ecuación (5) se usa para obtener el $\bar{\psi}_{hoja}$ a nivel canopia requerido para sostener un nivel dado de transpiración según sea limitada por la demanda atmosférica (T_p) o la humedad de suelo (U_{max}):

$$\bar{\psi}_{hoja} = \bar{\psi}_s \frac{T_p}{C_p} \quad \text{para } U_{max} > T_p \quad \bar{\psi}_{hoja} = \bar{\psi}_s \frac{U_{max}}{C_p} \quad \text{para } T_p > U_{max} \quad (6)$$

En este trabajo se presentan las adaptaciones realizadas al modelo SWB para la simulación de la fluctuación de la capa freática y la influencia recíproca de la dinámica de la misma y de sales en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Para la simulación de la fluctuación de la capa freática se utiliza la densidad de flujo de agua (J_{li} , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en el nodo m (J_{m+1}), siendo m el número de capas que entran en la solución del balance de agua según la ecuación (1). Este flujo puede ser descendiente o ascendente hacia o desde el nodo $m+1$ respectivamente. La ecuación (1) incluye implícitamente las densidades de flujo de agua (J_{li}) entrantes y salientes en cada nodo i desde o hacia la capa subyacente respectivamente ($i+1$). Al comienzo de cada paso se recalcula el valor de profundidad de la capa freática (w_{tz} , m). Para computar el cambio de w_{tz} , se calcula el contenido hídrico (θ_{SatL} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) de la capa con presencia de la capa freática ($SatL$), la cual correspondería al nodo ($m+1$), como un promedio ponderado entre los contenidos de agua de la capa por encima de $SatL$ (m) y el de saturación de $SatL$. A su vez, previo a la ejecución de la solución, con el valor de w_{tz} se coteja cuál es la capa $SatL$ y se determinan cuáles serán las capas superiores a la misma que participen en la solución. Según el planteo del sistema de ecuaciones de la solución numérica, $SatL$ corresponde al nodo $m+1$. Por lo tanto, el contenido hídrico θ_{SatL} de dicha capa determina el valor de potencial agua del suelo que se usa como condición de límite inferior para el sistema de ecuaciones y consecuentemente el valor de la conductividad hidráulica no saturada que controla el aporte/recarga de agua al perfil desde $SatL$ ($K(\psi)_{i+1}$, kg s m^{-3}) en presencia de capa freática.

Tanto la adaptación del transporte de sales dentro del perfil y desde la capa freática como su influencia en el cultivo se basa mayormente en Ferrer & Stöckle (1999) quienes implementaron esas adaptaciones al modelo CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003). La elección de ese trabajo se basa en que dicho modelo, en su estructura básica, es muy similar al SWB. Para el transporte de sales se implementa una solución numérica de diferencias finitas considerando solo convección como mecanismo de transporte y al momento no se incluye la química de interacción entre sales:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{\partial J_{si}}{\partial z_i} \quad (7)$$

Donde S_i es la concentración de solutos en el suelo (kg m^{-3}) en la capa i y J_{si} es la densidad de flujo de solutos a través de las capas de suelos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Este último se calcula como el producto de la densidad de flujo de agua por la concentración de solutos en la solución del suelo (kg m^{-3}).

La influencia de la salinidad y anegamiento se estiman como el efecto que tienen ambas limitantes en la C_{pi} de la ecuación (3) mediante el reemplazo de dicho término por una conductancia de la planta corregida (C_{pi}^*) por factores de salinidad (F_{si}) y de anegamiento (F_{ai}):

$$C_{pi}^* = C_{pi} F_{si} F_{ai} \quad (8)$$

Ambos factores varían de 0 a 1, se calculan para cada capa i y simulan el efecto conjunto que tendrían tanto el incremento de la salinidad en la solución del suelo como la disminución de la aireación en la reducción del transporte de agua a nivel de raíces. Por lo tanto, ambos afectan la transpiración a nivel del perfil del suelo agregando de este modo el efecto de sales y contenido hídrico de cada capa que resultan de la interacción de la fluctuación de la capa freática, transporte de agua en la zona vadosa, los procesos de absorción de agua por parte de las raíces y el transporte de sales.

Para el efecto de sales (F_{si}) se sigue el esquema y razonamiento de Ferrer & Stöckle (1999) quienes adaptan la formulación propuesta por Van Genuchten (1987) y aplicada luego por Steppuhn *et al.* (2005), que relaciona en su forma funcional el rendimiento relativo de los cultivos con la conductividad eléctrica del suelo (CE_s) y como parámetro de cultivo una conductividad eléctrica correspondiente al 50% de reducción del rendimiento relativo (CE_{s50}). Además, para complementar el efecto de sales a nivel de C_{pi} en cada nodo se incluye el potencial osmótico de suelo (ψ_o) en la ecuación (3). El factor F_{ai} se estima en función del contenido hídrico entre capacidad de campo y saturación, contenido hídrico que suele presentarse con capa freática somera y cercana a raíces con transpiración activa.

Calibración y escenarios simulados

La calibración del modelo se realizó con datos de biomasa, rendimiento en grano (*Rend*) y *w_{tz}* de un ciclo de cultivo de soja medidos en Laboulaye para dos situaciones de suelo representativas (Videla Mensegue *et al.* 2006). El ajuste del modelo se evaluó con los siguientes indicadores: raíz del error medio cuadrático (RMSE), raíz del error medio cuadrático relativo (RRMSE) y índice de agregación de Willmott (Willmott, 1982; Kobayashi y Salam, 2000).

Para comprender y cuantificar la influencia recíproca de la capa freática y salinidad del suelo con el cultivo se utilizaron resultados de una serie de simulaciones realizadas con el modelo SWB adaptado. Se simularon dos situaciones representativas del sur de Córdoba con cultivo de soja (grupo de madurez 4) sembradas el día seis de Noviembre. Las situaciones fueron: Mackenna (MAC) y Laboulaye (LAB) usando perfiles de suelos representativos. En MAC se simuló un suelo arenoso franco y en LAB un franco arenoso. Se utilizaron rangos de profundidad y salinidad característicos y dos escenarios de precipitación durante el ciclo de crecimiento (*P*): húmedo (HUM) y seco (SECO) con *P* de 590 y 230 mm respectivamente para ambas situaciones. Las simulaciones se inicializaron con 6 valores de *w_{tz}* (0,5 a 3 m) y con dos conductividades eléctricas iniciales de capa freática (*CE_{w_{tz}}*): media y alta: respectivamente 4 y 8 dS m⁻¹ para MAC y 7 y 15 dS m⁻¹ para LAB. Además se simularon las situaciones MAC y LAB con ambos regímenes de precipitación sin presencia de capa freática. Se adicionaron estos últimos escenarios para comparar predicciones de rendimiento basados en balances hidrológicos de suelo que incluyen la influencia de la capa freática con aquellas en que su influencia es completamente omitida. Debido a la gran cantidad de salidas, tanto en número como en detalle, solo algunos de ellas son presentados y analizados en este trabajo para discutir las principales tendencias sugeridas por el modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del modelo

Los resultados de la calibración de SWB para la simulación de biomasa, *Rend* de soja y *w_{tz}* son presentados en la Tabla 1. El RRMSE para biomasa y *Rend* fue 8,6% y el *d* 0,99 mostrando estos estadísticos un buen ajuste. La modelación de la *w_{tz}* mostró un ajuste aceptable con un error medio de 0,25 m (RMSE). Además, cabe mencionar que fue difícil encontrar datos de contenido hídrico y salinidad a diferentes profundidades y fluctuación de la capa freática que puedan ser usados adecuadamente para una calibración más extensiva de este tipo de modelos detallados.

Tabla 1: Indicadores estadísticos de biomasa, *Rend* y *w_{tz}* obtenidos en la calibración de SWB. n = número de datos, RMSE = raíz del error medio cuadrático, RRMSE = raíz del error medio cuadrático relativa, y *d* = índice de Willmott.

Variable	n	RMSE	RRMSE	d
Biomasa y <i>Rend</i> (t ha ⁻¹)	6	0,33	8,6%	0,99
<i>w_{tz}</i> (m)	13	0,25	15,2%	0,9

Dinámica de la capa freática y rendimiento del cultivo

En la Figura 1 se muestra la respuesta de *Rend* de soja para las situaciones MAC y LAB. En general se observa que la capa freática tiene un grado de influencia variable sobre *Rend* según *w_{tz}*, la salinidad del suelo y *P*.

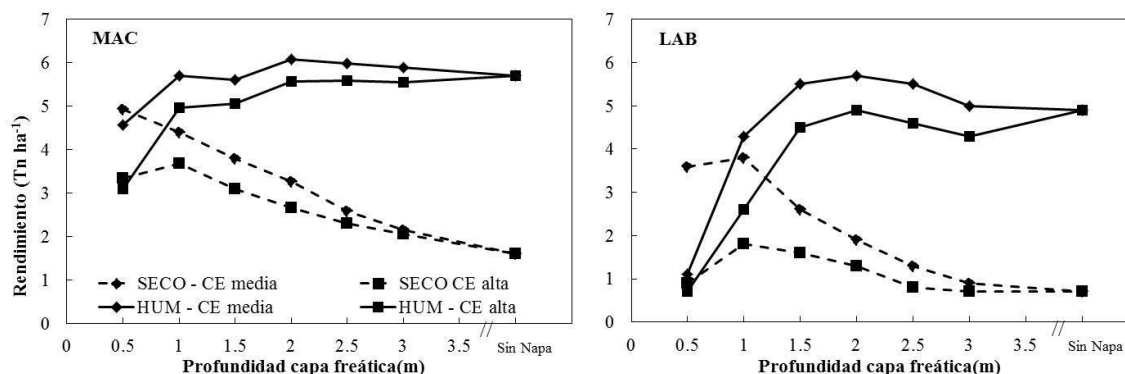




Figura 1: Respuesta del rendimiento en función de la profundidad, salinidad de la capa freática y escenario climático para dos tipos de suelos representativos del sur de Córdoba (arenoso franco = Mackenna y franco arenoso = Laboulaye).

Tabla 2: Rendimiento (*Rend*), Transpiración en el ciclo (T_s), Aporte Freático (*AF*), relación *AF/T* y cambio de nivel freático (Δwtz) para las situaciones MAC y LAB, en ausencia de capa freática somera y $wtz=1m$ para HUM y SECO.

	<i>Rend</i> Tn ha ⁻¹	<i>AF</i> mm	T_s mm	<i>AF/T</i>	Δwtz m
MAC s/freat HUM	5,7		405		
MAC s/freat SECO	1,6		226		
MAC $wtz=1m$ HUM	5,7	148	367	0,40	0,51
MAC $wtz=1m$ SECO	4,4	196	315	0,62	0,84
LAB s/freat HUM	4,9		337		
LAB s/freat SECO	0,7		145		
LAB $wtz=1m$ HUM	4,3	24	234	0,10	0,20
LAB $wtz=1m$ SECO	3,8	174	296	0,59	0,53

En ambas situaciones el *Rend* fue mayor con mayor *P* y menor $CEwtz$. Además, se observó que el *Rend* para el régimen SECO en ambas situaciones disminuye notablemente con el incremento de wtz a partir de $wtz=1m$ comparado con HUM. La tendencia de mayores rendimientos en ciclos húmedos en situaciones con influencia de capa freática está de acuerdo con lo obtenido por Nosetto *et al.* (2009) quienes presentaron relaciones de rendimientos con profundidad de capa freática basadas en un número muy considerable de observaciones en la misma región. Estos autores encontraron importantes diferencias en el rendimiento de soja (aproximadamente 2 t ha⁻¹) cuando compararon rendimientos absolutos de un año húmedo y uno seco. También obtuvieron, en línea con nuestros resultados, un mayor descenso de *Rend* con el aumento de wtz en un régimen de menor comparado con uno de mayor *P*. Si bien, el incremento de *Rend* con mayores *P* es esperable, sería importante considerar las causas del incremento de rendimiento atribuidas a una capa freática somera per sé.

La Tabla 2 presenta los resultados seleccionados para una wtz de 1 m para las situaciones HUM y SECO en MAC y LAB, ambas con bajas $CEwtz$ y los resultados obtenidos de las simulaciones sin presencia de capa freática. Los resultados muestran que los *Rend* están relacionados primeramente con el volumen transpirado durante el ciclo de crecimiento (T_s , mm) ($R^2=0.83$, $p>0,05$) pero comparando los *Rend* de situaciones con presencia y ausencia de capa freática se observa que el aporte neto de agua de la capa freática (*AF*, mm) en años secos puede alcanzar valores de 60% de la T_s . El valor de *AF* para un ciclo se extrae de las simulaciones como la densidad de flujo de agua de la capa de suelo (J_{m+1}) por debajo de las capas enraizadas y que provendría principalmente de *SatL* y representaría el aporte neto de flujos tanto ascendentes como descendentes desde la capa freática a la zona vadosa con raíces. Los resultados obtenidos sugieren que el grado de influencia relativa de la capa freática en los rendimientos en años de menor *P* está dado por los menores contenidos y potenciales agua en las capas enraizadas que resultan de los menores aportes pluviales (mayor desecamiento). Estos tendrían efectos directos en T_s (y en *Rend*) y en el aumento del gradiente directriz del flujo de agua desde *SatL* (ecuación 1) hacia las capas con raíces en activa absorción. Otra causa posible de mayores *Rend* con mayor *P* puede ser un efecto de dilución de sales en la solución del suelo que contribuya a mayores *Rend* y especialmente situaciones donde el contenido salino del suelo alcanza niveles limitantes para el crecimiento del cultivo como pe. en LAB. La Tabla 2 también muestra el cambio de wtz desde el comienzo hasta el final de la simulación (Δwtz , m). Los valores de Δwtz , según la implementación del modelo al momento, no incluyen aportes ni descargas laterales subterráneas ni aportes superficiales. Un factor de calibración puede ser agregado en el cálculo de recarga/descarga para considerar aquellos componentes del balance hidrológico no incluidos explícitamente (Anderson *et al.*, 2015) hasta en tanto no se incluya e integre a este balance de agua del continuo suelo-cultivo-atmósfera, que sólo opera en la dimensión vertical, el cálculo explícito de la dinámica lateral de la capa freática y escurrimientos superficiales.

Analizando el efecto de $CEwtz$ y la consecuente salinidad del suelo, en general el *Rend* disminuyó con el aumento de $CEwtz$. Con menor salinidad y suelos con textura más arenosa se observa que el *Rend* se mantuvo relativamente alto con wtz muy cercana a la superficie como pe. La situación MAC. Esto sugiere que el efecto negativo de anegamiento sólo operaría con contenidos hídricos muy altos o freática muy somera. El modelo no simula explícitamente los problemas de manejo y aquellos relacionados con inundación como falta de piso que suelen acompañar a este tipo de situaciones de capa freática muy cercana a superficie y que reducen notablemente los rendimientos en estos sitios anegados.

CONCLUSIONES



Se concluye que el modelo SWB es una herramienta adecuada para comprender las relaciones funcionales entre la capa freática salina y el crecimiento del cultivo. Se encontró que la influencia de la capa freática sobre el rendimiento del cultivo está vinculada a la interacción entre la precipitación durante el ciclo de crecimiento, la profundidad y salinidad de la capa freática. No obstante, debido a que su base de cálculo es mayormente determinística-mecánica, sería necesaria su ampliación e incluir mayor número de procesos tanto en la dimensión vertical como en la dimensión espacial para utilizar debidamente su capacidad de producir resultados detallados y exhaustivos para una comprensión integral del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.; L. Pereira; D. Roes & M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO - Irrigation and Drainage, Roma, Italia.
- Anderson, M.; W. Woessner & R. Hunt. 2015. Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport. 2da edn. Academic Press, Elsevier. London. 630p
- Campbell, G.S. & C. O. Stöckle. 1993. Prediction and simulation of water use in agricultural systems. Proceeding of the International Crop Science Congress, Iowa State University. Iowa, USA.
- Cisneros, J. M.; J. J. Cantero & A. Cantero. 1999. Vegetation, soil hydrophysical properties, and grazing relationships in saline-sodic soils of Central Argentina. Canadian journal of soil science, 79(3), 399-409.
- Cisneros, J. M.; J. M. Scilingo; O. Giayetto; F. Morla & E. Jobbágy. 2013. Uso del modelo de simulación Aquacrop Fao para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. En Actas XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan.
- Ferrer, F. & C.O. Stöckle. 1999. A model for assessing crop response to salinity. Irrig. Sci. 19, 15-23.
- Kobayashi, K. & M. U. Salam. 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. Agron. J. 92, 345-352.
- Marcos, J. 1997. Corn production under dryland conditions in eastern Washington. Department of Crop and Soil Sciences. Washington State University, Pullman, USA.
- Noretto, M.D.; R.A. Paez; S.I. Ballesteros & E.G. Jobbágy. 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. Agric. Ecosyst. Environ. 206, 60-70. doi:10.1016/j.agee.2015.03.009
- Noretto, MD; E.G. Jobbágy; R.B. Jackson & G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. Field Crop Res. 113: 138-148.
- Steppuhn, H.; M. Th. van Genuchten & C. M. Grieve. 2005. Root-Zone Salinity: I. Selecting a Product-Yield Index and Response Function for Crop Tolerance. Crop Sci. 45:209-220.
- Stöckle, C.O.; M. Donatelli & R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy 18:289-307.
- Tanner, C.B. & T.R. Sinclair. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-research? En: H. M. Taylor, J. R. Wayne, S. R. Thomas (Eds.) Limitations to Efficient Water Use in Crop Production, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p. 1-27.
- Van Genuchten MT. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report 121. USDA-ARS, US Salinity Laboratory, Riverside, Calif.
- Videla Mensegue, H.; A. Degioanni & J. Cisneros. 2006. Peligro de salinización en suelos bajo producción agrícola en secano. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta – Jujuy.
- Videla Mensegue, H.; J. Marcos; A. Degioanni & E. Bonadeo. 2016. Modelo de simulación de sistemas de cultivo SWB-Rot (Soil Water Balance): calibración y validación para la región pampeana Argentina. 8º Congreso Argentino de AgroInformática. 45 JAIIO-CAI. CABA. Argentina.
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63, 1309-1313.