

EVALUACIÓN DE DISTINTAS FUNCIONES DE INFILTRACIÓN ACOPLADAS EN UN MODELO NUMÉRICO DE CIRCULACIÓN DE FLUJO EN AGUAS SOMERAS

María Nofuentes Muñoz y María José Polo Gómez

Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola
Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes
Universidad de Córdoba
Campus de Rabanales. Edificio Leonardo da Vinci. Área de Ingeniería Hidráulica. 14071, Córdoba
e-mail: (mnofuentes, mjpolo)@uco.es, web: www.dinamicaambiental.com

Palabras clave: Flujo superficial, infiltración, modelado numérico.

RESUMEN. *El modelado del proceso de circulación de agua superficial en la zona no saturada del suelo requiere una adecuada caracterización del proceso de infiltración. La circulación unidimensional superficial del flujo de agua se describe mediante las ecuaciones de Saint-Venant, acoplando la función de infiltración como término fuente. La validez de la simplificación 1D en situaciones transitorias del régimen de agua depende de la capacidad de la ecuación de infiltración adoptada. El objetivo de este trabajo es evaluar la idoneidad de dos ecuaciones de infiltración como son la de Lewis-Kostiakov y Green y Ampt para el modelado de la circulación superficial de agua y el transporte de solutos, resolviendo el sistema de ecuaciones con el esquema numérico de MacCormack. Se comparan los resultados con datos experimentales obtenidos en parcelas de riego por surcos en 2003.*

ABSTRACT. *Surface flow process modeling over the vadose zone requires a well infiltration process characterization. 1D surface flow is described by Saint-Venant equations with the infiltration function coupled as a source term. The infiltration function selected determines the 1D simplifications validity in transient flow conditions. The aim of this work is to test two infiltration functions suitability as Lewis-Kostiakov and Green and Ampt equations to model solute transport in surface flow, solving the equations system with the MacCormack numerical scheme. Results are compared with experiments carried out in an irrigation field in 2003.*

1. INTRODUCCIÓN

El modelado del proceso de circulación de agua superficial en la zona no saturada del suelo requiere una adecuada caracterización del proceso de infiltración. La circulación unidimensional superficial del flujo de agua se suele describir mediante las ecuaciones de Saint-Venant, a las que se le puede acoplar la función de infiltración como término fuente. La validez de la simplificación 1D en situaciones transitorias del régimen de agua depende no sólo de la uniformidad del sistema sino de la capacidad de la ecuación de infiltración adoptada para reproducir la variabilidad temporal existente, y su acople en el esquema numérico implementado. Estos efectos sobre la bondad final del modelo numérico se multiplican cuando se estudia el transporte de solutos en el flujo de agua.

Cuando el agua circula con una condición de contorno aguas arriba concreta, es el suelo el que controla la circulación en superficie, ya que según su capacidad de infiltración y su estado inicial, el flujo de agua infiltrado evoluciona y con ello el caudal en cada punto de la superficie. Por ello, el modelado adecuado de este proceso en la zona no saturada es fundamental para el estudio de cualquier aspecto relacionado con el flujo de agua, como es el transporte de solutos. En el ámbito de la fertirrigación se ha estudiado previamente cómo modelar numéricamente el transporte de fertilizante en el flujo de agua superficial y su infiltración y distribución en el medio poroso (García-Navarro, et al., 2000; Abbasi et al., 2003; Sabillón y Merkle, 2004; Strelkoff et al., 2006; Nofuentes, 2007). Los resultados obtenidos han mostrado una buena aproximación de la circulación de agua, pero no tan buena en la circulación y distribución de fertilizante. Todo ello puede ser debido a las simplificaciones realizadas en las ecuaciones y a la función escogida para modelar la infiltración.

El objetivo de este trabajo es evaluar la idoneidad de dos ecuaciones de infiltración como son la de Kostiakov-Lewis y Green y Ampt para el modelado de la circulación superficial de agua y el transporte de solutos. Para lo

que se han resuelto las ecuaciones de Saint Venant con el esquema numérico de MacCormack, la fricción con el modelo de Manning, y la ecuación de advección-dispersión para sustancias conservativas con el esquema de MacCormack para la advección y un esquema en diferencias centradas para la difusión. Se comparan los resultados con datos experimentales disponibles, obtenidos en parcelas de riego por surcos en 2003 en ensayos de transporte de nutrientes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño Experimental

Los datos experimentales utilizados se han obtenido de Nofuentes (2007). A continuación se presenta un resumen del diseño experimental y de las medidas realizadas. Se llevaron a cabo una serie de ensayos durante el verano de 2003 en una parcela experimental en la finca Alameda del Obispo de Córdoba, con suelo aluvial de clase textural franca, alto contenido en carbonato cálcico y pobre en materia orgánica, clasificado como *Typic xerofluvent* (Soil Survey Staff, 1999), o como *Eutric fluvisol* (FAO, 1988).

La parcela, de 135 m de longitud y 0.8 % de pendiente, se gradeó varias veces antes de aporcar surcos, a los que se les dio una separación de 0.75 m. Se regaron dos grupos de 3 surcos en la parcela, realizándose dos ensayos en cada grupo de surcos, el primero sobre el suelo recién gradeado y aporcado y el segundo sin que mediara ninguna labor tras el primer ensayo y sin que ocurriera precipitación alguna. Se aplicó un caudal de entrada constante en cabecera. Los caudales de entrada y salida se midieron con aforadores portátiles tipo RBC (Clemmens et al., 1984).

En cada ensayo se realizaron tres aplicaciones de soluto en cabecera en forma de solución concentrada, 5 kg de trazador (nitrato potásico, NO₃K) disueltos en 22.5 L de agua, mediante un pulso de 4 minutos de duración realizado en distintos momentos desde el comienzo del riego. El movimiento en superficie del soluto se evaluó midiendo la evolución temporal de la conductividad eléctrica (CE) del agua en secciones transversales en el surco (en cabecera, y a 33.75 m, 67.5 m, 101.25 m y 135 m de la misma) con conductímetros portátiles, calibrados previamente en laboratorio. En la tabla 1 se presentan las características del ensayo seleccionado para este trabajo, corresponde al ensayo 3, realizado en la segunda tanda de riego, por lo que el suelo dispone de cierta humedad inicial, y el lecho se encuentra más estabilizado que en los primeros ensayos, y por lo tanto las simplificaciones realizadas en las ecuaciones que modelan el proceso se aproximan más a las circunstancias reales de los experimentos.

Tabla 1. Características de los ensayos

Grupo surco	Ensayo	Q ₀ (L/s)	C ₀ (g/L)	T _{avance} (min)	T _{aplicación trazador} (min)		
					Ap.1	Ap.2	Ap. 3
A	3	0.66	19.4	39.5	34.5	58.4	87.4

2.2. Circulación superficial de agua

El movimiento del agua que discurre sobre la superficie del suelo en un surco se caracteriza por su transitoriedad tendiendo hacia variado y permanente. El caudal en cualquier punto del surco varía con el tiempo hasta que la velocidad de infiltración y el calado se estabilizan y se hacen constantes en el tiempo, en este momento el flujo pasa a tener carácter permanente. Las ecuaciones que describen este movimiento son las propuestas por Saint-Venant: conservación de masa (1) y de cantidad de movimiento (2).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + \frac{1}{2} gAh \right) = gA(S_0 - S_f) \quad (2)$$

en las que en cada punto x e instante t , A [L^2] es el área de la sección transversal a la dirección del flujo o área mojada, Q [L^3T^{-1}] es el caudal circulante, h [L] es el valor del calado en superficie, Z [L^3L^{-1}] es el volumen de agua infiltrada por unidad de longitud de surco, g [L^2T^{-1}] es la aceleración de la gravedad. S_0 [LL^{-1}] es la pendiente del lecho en la dirección longitudinal del surco, tomada con valor positivo en el sentido de avance del agua, y la pendiente de fricción, S_f [LL^{-1}], se puede describir mediante la ley de Manning, donde R_h [L] es el radio hidráulico:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{A^2R_h^{4/3}} \quad (3)$$

2.3. Infiltración de agua

La evolución temporal de Z ha sido estimada mediante las ecuaciones de Kostiakov – Lewis (4), comúnmente utilizada en el modelado de circulación de agua en riegos (e.g., Playán y Faci, 1997; Brufau et al., 2002; Nofuentes et al., 2005) y Green y Ampt (6), utilizada en la simulación de los procesos de infiltración debidos a la ocurrencia de precipitación (Chow, 1959; Esteves et al., 2000; Aguilar, 2008).

La ecuación de Kostiakov-Lewis depende de los parámetros empíricos k (LT^{-a}) y a (adimensional y con valores menores que 1) obtenidos a partir de las medidas de infiltración realizadas en un suelo determinado. t_{opp} es el tiempo de oportunidad ($t_{opp} = t - t_{avance}$), t es el tiempo actual y t_{avance} es el tiempo en el que el frente de avance de agua alcanza una determinada posición x . f_0 es la velocidad de infiltración para condiciones permanentes.

$$Z = k \cdot t_{opp}^a + f_0 \cdot t_{opp} \quad (4)$$

Para mejorar las estimaciones del volumen de agua infiltrado y el tiempo de avance del frente de agua se ha seguido la propuesta de Maikaka (2004), donde la tasa de infiltración depende del perímetro mojado (P [L]), el perímetro máximo de surco (P') y del área infiltrada (A_i [L^2]), así no se incluye en el modelo el tiempo de oportunidad, ya que puede introducir errores en estas estimaciones.

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} = f_0 P + Pak \left(\frac{A_i}{kP'} \right)^{\frac{a-1}{a}} \quad (5)$$

La ecuación de Green y Ampt (1911) (6) es una simplificación de la ecuación de Richards, que a su vez proviene de una combinación de la ecuación de Darcy y la ecuación de continuidad (Chow, 1959). Esta ecuación simplifica las condiciones iniciales y de contorno del problema, asume suelo profundo y homogéneo, con contenido de humedad inicial uniforme en profundidad, asumiendo que el movimiento de agua se produce en forma de frente con la misma velocidad en toda la sección transversal del suelo (flujo tipo pistón). Requiere las estimaciones de varios parámetros, que se consideran constantes, la conductividad hidráulica (K_s [LT^{-1}]), el intervalo de humedad desde la humedad en saturación a la inicial ($\Delta\theta$) y el potencial matricial en el frente (ψ_{mf} [L]):

$$i = k_s \left(\frac{(\psi_{mf} + h)\Delta\theta}{I} + 1 \right) \quad (6)$$

Donde se incorpora h a la ecuación ya que en este caso se produce inundación casi instantánea en superficie con la llegada del flujo de agua, por lo que hay que tenerlo en cuenta en la estimación de la tasa de infiltración i [LT^{-1}]. I [L] la altura acumulada de agua infiltrada en el suelo.

2.4. Circulación de solutos

La ecuación que describe el transporte de sustancias en el flujo de agua promediada en la sección transversal y vertical a la dirección del movimiento es la ecuación advección-dispersión (e.g., Rutherford, 1994). Para el caso de sustancia conservativa en flujos no uniformes se puede escribir (García-Navarro et al., 2000),

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AvC)}{\partial x} = -PiC + \frac{\partial}{\partial x} \left(EA \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (7a)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = PiC \quad (7b)$$

Donde C [ML^{-3}] representa la concentración promediada en la sección transversal, ϕ [ML^{-1}] masa de soluto infiltrada por unidad de longitud de surco y E [L^2T^{-1}] el coeficiente de dispersión longitudinal, que se asume constante.

2.5. Esquema numérico

Para resolver el cálculo de las variables de estado del flujo conjunto de agua y solutos en surco de riego, se ha recogido la experiencia de otros autores. En concreto, se ha adoptado el método predictor-corrector de MacCormack por su sencillez y adecuada resolución de las ecuaciones de Saint-Venant (Fennema y Chaudhry, 1986; García-Navarro y Saviron, 1992; Playán y Faci, 1997; García-Navarro et al., 2000; Burguete, 2003; García-Navarro et al., 2004). Concretamente se ha seguido el esquema propuesto por Maikaka (2004) en el que se clasifican los términos en función de sus propiedades, resolviendo separadamente los términos dinámicos, los de infiltración y los de fricción Maikaka, (2004). Para resolver la ecuación (7) de advección-dispersión, se siguieron las pautas establecidas por García-Navarro et al. (2000). Los detalles se encuentran recogidos en Nofuentes (2007).

3. RESULTADOS

3.1. Calibración del flujo de agua

La circulación del flujo de agua se calculó calibrando el coeficiente de rugosidad de Manning, y los coeficientes de las ecuaciones de infiltración (Tabla 2), que se asumen constantes para todo el tiempo de cálculo. Se realizó una primera aproximación de estos parámetros con el método de los dos puntos de Walker (1989) para los parámetros de Kostiakov-Lewis, y con el modelo Rosetta (Schaap et al., 2001) para los de Green y Ampt. En la Tabla 2 se presentan los valores de los parámetros calculados, para evaluar la bondad de la calibración se ha calculado la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) entre los valores de tiempo de avance del flujo calculados y medidos, así como entre los valores de escorrentía a la salida del surco.

Tabla 2. Valores de los parámetros de calibración del flujo de agua y error cometido en la calibración del flujo de agua.

Kostiakov-Lewis				Green y Ampt				RMSE (K-L/G-A)	
n (S.I.)	k ($m s^{-3}$)	a	f_0 ($m s^{-1}$)	K_s ($m s^{-1}$)	Ψ_{inf} (m)	$\Delta\theta$	n (S.I.)	Avance	Escorrentía
0.018	0.005	0.20	$3.80 \cdot 10^{-7}$	$8.1 \cdot 10^{-7}$	-0.98	0.34	0.018	3.40/5.05	0.20/0.31

3.2. Calibración del transporte de trazador

El parámetro de calibración del transporte de trazador en el flujo de agua es el coeficiente de dispersión

longitudinal. En la tabla se presenta el valor de este coeficiente que proporciona los mejores resultados calculados comparados con los experimentales.

Tabla 3. Valores del coeficiente de dispersión longitudinal

Modelo Infiltración	E (m ² s ⁻¹)		
	Ap. 1	Ap. 2	Ap. 3
Kostiakov-Lewis	0.028	0.078	0.098
Green y Ampt	0.019	0.052	0.079

En las figuras 1 y 2 se muestran la evolución temporal del trazador medido en campo y calculado con los dos modelos de infiltración de Kostiakov-Lewis y Green y Ampt respectivamente. En la figura 1 se observa que las curvas calculadas se retrasan respecto a las medidas en la aplicación 1, con un tiempo de desfase máximo de 3 minutos, a medida que el flujo superficial se estabiliza estas diferencias desaparecen, aplicaciones 2 y 3, aunque proporciona unos valores de concentración más elevados que los observados, llegando a alcanzar una diferencia máxima de 0.27.

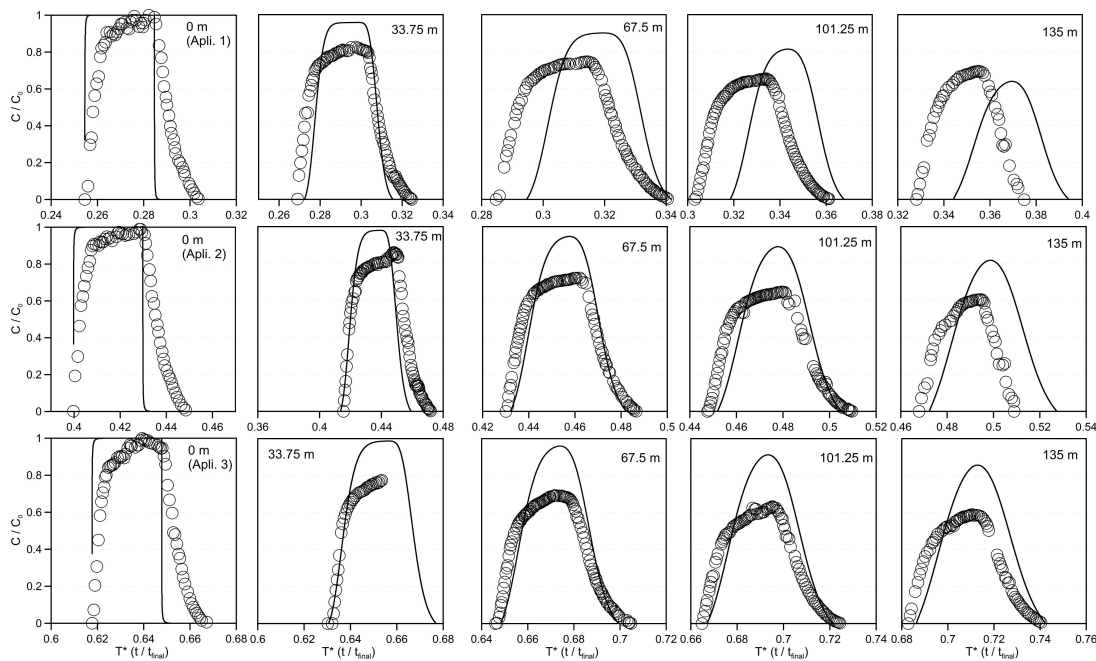


Figura 1. Evolución temporal de trazador medido (círculos), calculado (línea), aplicaciones 1, 2 y 3. Modelo de Kostiakov-Lewis.

La figura 2 muestra como las curvas calculadas se retrasan respecto a las medidas sobre todo en la aplicación 1, correspondiente al régimen transitorio del flujo, reduciéndose en las siguientes aplicaciones. En general se observa que los valores de concentración calculados se ajustan mejor a los observados, existiendo las mayores diferencias a medida que el soluto alcanza el final del surco, sobre todo en la primera aplicación. Estas diferencias se pueden deber a que no se está reproduciendo con exactitud la heterogeneidad del surco con las simplificaciones realizadas en las ecuaciones, como por ejemplo con el modelo de fricción, aún así, se puede observar que el modelo de infiltración de Green y Ampt reproduce más satisfactoriamente el transporte de solutos.

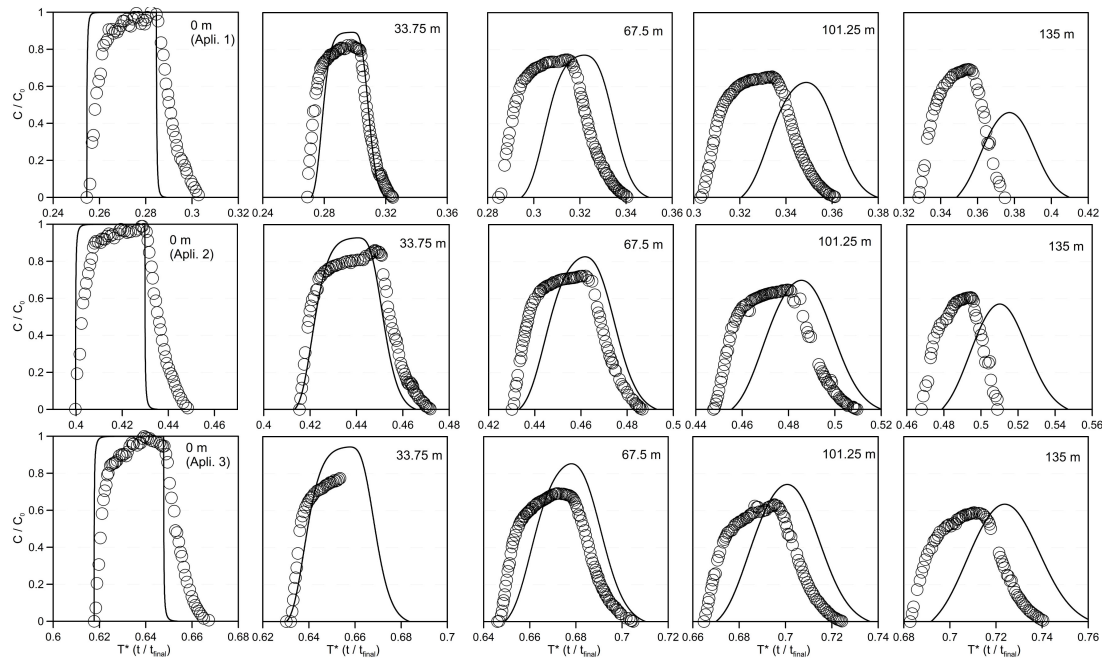


Figura 2. Evolución temporal de trazador medido (círculos), calculado (línea). Aplicaciones 1, 2 y 3. Modelo de Green y Ampt.

La calibración realizada con estos modelos implican diferentes datos de partida, así el modelo de Kostiakov-Lewis necesita los tiempos de avance del frente a lo largo de la parcela y el balance de masa de agua, en cambio, para calibrar el modelo de Green y Ampt se requiere un mayor número de datos de partida como son la textura del suelo, la conductividad hidráulica saturada, el potencial matricial del frente de humedecimiento, lo que hace más complicado el proceso.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado una primera evaluación de la idoneidad de dos modelos de infiltración diferentes en el transporte de sustancias en el flujo superficial de agua, cuando el suelo condiciona el tipo de circulación en función de sus características. Se ha comprobado que con el modelo físico de Green y Ampt se obtienen mejores resultados que con el empírico de Kostiakov-Lewis. En general las diferencias encontradas entre los resultados calculados y medidos se pueden deber a las simplificaciones de partida en las ecuaciones, sería interesante avanzar en este sentido, y acoplar el modelo físico de infiltración con un modelo de fricción que tenga en cuenta la variabilidad espacial del suelo.

REFERENCIAS

- Abbasi, F., Simunek, J., Genuchten, M. Th., Feyen, J., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Strelkoff, T. S., Shouse, P. 2003b. Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis. *J. Irrig Drain. Engng.*, 129(2): 71-81.
- Aguilar, C. 2008. Efectos de escala en procesos hidrológicos. Aplicación a la cuenca del río Guadalfeo (Granada). Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. http://www.cuencaguadalfeo.com/archivos/Guadalfeo/Tesis/TesisCris_en.pdf
- Brufau, P., García-Navarro, P., Playán, E., Zapata, N. 2002. Numerical modeling of basin irrigation with an upwind scheme. *J. Irrig Drain. Engng.*, 128: 212-223.
- Burguete, J. 2003. Modelos unidimensionales de flujos de superficie libre y transporte en geometrías irregulares: aplicación al flujo en ríos. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Chow, V. T. 1959. *Open channel flow*. McGraw-Hill. Nueva York.
- Clemmens, A. J., Bos, M. G. y Replage, J. A. 1984. Portable RBC flumes for furrows and earthen channels. *Trans. ASAE.*, 27: 1016-1022.
- Esteves, M., Faucher, X., Galle, S. y Vauclin, V. 2000. Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain:

- numerical results versus observed values. *J. Hydrol.* 228: 265-282.
- FAO. 1988. *Soil Map of the World. Revised Legend*. World Soil Resources Report. FAO. Roma.
- Fennema, R. J., Chaudhry, M. H. 1986. Explicit numerical Schemes for unsteady freesurface flows with shocks. *Water Resour. Res.*, 22: 1923-1930.
- García-Navarro, P., Playán, E., Zapata, N. 2000. Solute transport modeling in overland flow applied to fertigation. *J. Irrig Drain. Eng.*, 126: 33-40.
- García-Navarro, P., Saviron, J. M. 1992. McCormack's method for the numerical simulation of one-dimensional discontinuous unsteady open channel flow. *J. Hydr. Res.*, 30: 95-105.
- García-Navarro, P., Sánchez, A., Clavero, N., Playán, E. 2004. Calibration model for level furrows. II: Description, Validation, and Application. *J. Irrig Drain. Engng.*, 130: 113-121.
- Green, W.H., y G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4(1), 1-24.
- Maikaka, M. 2004. *Modelos numéricos unidimensionales en riego por superficie*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Nofuentes, M., Polo, M. J., Giráldez, J. V. and Mateos, L. 2005. Transferencia de sustancias desde el suelo al flujo superficial de agua. *Jornadas de investigación en la zona no saturada del suelo(La Coruña)* Vol VII. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero.
- Nofuentes, M. 2007. Transporte de solutos en el flujo de agua en riego por surcos. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.
- Playán, E. y Faci, J. M. 1997. Border fertigation: field experiments and simple model. *Irrig. Sci.*, 17:163-171.
- Rutherford, J. C. 1994. *River Mixing*. J. Wiley, Chichester.
- Sabillón, G. N., Merkle, G. P. 2004. Fertigation guidelines for furrow irrigation. *Span. J. Agric. Res.*, 2: 576-587.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, y M.T. Van Genuchten. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163-176.
- Strelkoff, T. S., Clemmens, A. J., Perea-Estrada, H. 2006. Calculation of non-reactive chemical distribution in surface fertigation. *Agric. Water Manag.*, 86:93-101.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy*, USDA Agr. Hbk. no. 436, 2ª ed., Washington. Steenhuis, T. S., Walker, M. F. 1980. Closed form solution for pesticide loss in runoff water. *Trans. ASAE*, 23: 615-628.
- Walker, W. R. 1989. *Guideline for designing and evaluating surface irrigation systems*. *Irrig. Drain.* Paper No. 45. FAO, Roma.
- Zapata, N., Burguete, J., Santos, E. P., Playán, E. and P. García-Navarro (2007), Furrow fertigation simulation model, calibration, validation and application. *International Workshop on Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources* (18-21 June, 2007), pp.: 339-343. Zaragoza. Spain.